

30-0242/001

INSTITUT FÜR BAUSTOFFKUNDE UND STAHLBETONBAU  
DER TECHNISCHEN UNIVERSITÄT BRAUNSCHWEIG  
DIREKTOR: PROF. DR.-ING. K. KORDINA

30-0242/001

Abschlußbericht

über das Forschungsvorhaben

"Untersuchung des Trag- und Verformungsverhaltens  
von ausmittig beanspruchten schlanken Stahl-  
betonwänden"

BIBLIOTHEK  
Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz  
der Technischen Universität Braunschweig  
Beethovenstraße 52  
D-3300 Braunschweig

vorgelegt von

Dipl.-Ing. K.H. Storkebaum

Auftraggeber : Innenministerium des Landes  
Nordrhein-Westfalen  
VB 1 - 72.02 - Nr. 48/74

Braunschweig, im August 1976

## Inhaltsverzeichnis

	Seite
1. Einleitung	1
1.1 Allgemeines	1
1.2 Zielsetzung	2
1.3 Zur Definition von Wänden	3
1.4 Berechnungsmethoden für ausmittig belastete schlanke Wände und Literaturüberblick	4
2. Berechnungsmethode	7
2.1 Beschreibung des Lösungsweges	7
2.2 Definition der Traglast	9
2.3 Rechenannahmen	9
2.4 Lösungsmethode	12
2.5 Diskussion der Versagenskriterien	15
2.6 Berücksichtigung der Torsionssteifigkeit	18
3. Berechnung der im Versuch geprüften Wände mit Gegenüberstellung der experimentellen und rechnerischen Ergebnisse	23
3.1 Überblick	23
3.2 Abmessungen, Baustoffkennwerte und Bewehrung	26
3.3 Meßergebnisse	26
3.4 Versuchsnachrechnungen	27
3.5 Vergleich der rechnerischen Traglasten mit anderen Methoden und mit den Versuchsergebnissen	31
4. Allgemeines Trag- und Verformungsverhalten und Parameterstudien	34
4.1 Allgemeines Trag- und Verformungsverhalten	34
4.2 Parameterstudien	45
5. Schlußfolgerungen mit Vorschlägen für eine Verbesserung des jetzigen Bemessungsweges für vierseitig gehaltene Stahlbetonwände in DIN 1045	53
6. Zusammenfassung	58

## Literaturverzeichnis

- [1] Beton- und Stahlbetonbau, Bemessung und Ausführung - DIN 1045, Ausg. Jan. 1972.
- [2] Deutscher Ausschuß für Stahlbeton, Heft 220, Bemessung von Beton- und Stahlbetonbauteilen, Berlin, 1972.
- [3] Lewicki, Karwoski, Pawlikowski: Wohngebäude aus Beton und Stahlbeton, Düsseldorf, 1971.
- [4] Wiegand, E.: Ein Beitrag zur Beulstabilität von Stahlbetonwänden mit nichtlinear-elastischem Werkstoffgesetz. Dissertation, T.H. Darmstadt, 1970.
- [5] Wiegand, E.; Uhlisch, D.: Tafeln zur Traglastermittlung von Stahlbetonwänden, 1973, bisher nicht veröffentlicht.
- [6] Kordina, K.; Storkebaum, K.H.: Untersuchungen über die Traglasten ausmittig beanspruchter Stahlbetonwände, Forschungsbericht, T.U. Braunschweig, 1973.
- [7] Huber, M.T.: Die Theorie der kreuzweise bewehrten Eisenbetonplatten ..., Der Bauingenieur, 1923, 1924, 1925, 1926
- [8] Storkebaum, K.H.: Ermittlung der Traglast von vierseitig gehaltenen Stahlbetonscheiben, Veröffentlichung in Vorbereitung
- [9] Quast, U.: Geeignete Vereinfachungen für die Lösung des Traglastproblems der ausmittig gedrückten primatischen Stahlbetonstütze mit Rechteckquerschnitt, Dissertation T.U. Braunschweig, 1970.
- [10] Chwalla, E.: Hilfstafeln zur Berechnung von Spannungsproblemen der Theorie II. Ordnung und von Knickproblemen, Köln, 1959.
- [11] HSU, T.T.C.: Torsion of Structural Concrete - behaviour of Reinforced Concrete Members, ACI Publication, SP - 18, 1968.

- [12] Bay, H.: Achsverdrehung aus Torsion im Stadium II bei gleichzeitiger Einwirkung von Biegemoment, Querkraft und Normalkraft, Beton- und Stahlbetonbau, 7/1970.
- [13] Ojha, S.K.: Die Steifigkeit und das Verformungsverhalten von Stahlbeton- und Spannbetonbalken unter kombinierter Beanspruchung aus Torsion, Biegemoment, Querkraft und Axialkraft. Forschungsbericht T.U. Braunschweig, 1973.
- 
- [14] Deutscher Ausschuß für Stahlbeton, Heft 240: Hilfsmittel zur Berechnung der Schnittgrößen und Formänderungen von Stahlbetontragwerken, Berlin 1976
- 
- [15] Ernst, G.C.; Hromandik, J.J.; Riveland, A.R.: Inelastic Buckling of Reinforced Plates, Universita of Nebraska, 1953
-

## 1. Einleitung

### 1.1 Allgemeines

Das Forschungsvorhaben "Untersuchung des Trag- und Verformungsverhaltens von ausmittig beanspruchten schlanken Stahlbetonwänden" stellt eine Fortsetzung von theoretischen Untersuchungen über die Grundlagen von Stahlbetonstab- bzw. flächentragwerken sowie eines im Auftrage des Landes Nordrhein-Westfalen durchgeführten Versuchsprogramms an ausmittig belasteten, vierseitig gehaltenen Stahlbetonwänden dar. Die Grundlagenuntersuchungen einschl. der Erstellung eines elektronischen Rechenprogramms wurden dabei mit Eigenmitteln finanziert.

Bei den ersten Nachrechnungen der Versuchsergebnisse hatte es sich herausgestellt, daß das damals verwendete Rechenmodell eines drillweichen Trägerrostes im Vergleich zu den Versuchsergebnissen und auch zu den Ergebnissen von Wiegand [4] zu niedrige Traglasten liefert. Im Rahmen der vorliegenden Untersuchungen sollte daher die Torsionssteifigkeit zumindest näherungsweise mit in Ansatz gebracht und ihr Einfluß auf die Höhe der Traglasten studiert werden. Des weiteren sollten wirklichkeitsnahe Versagenskriterien zur besseren Erfassung der Wandtragreserven entwickelt werden.

Eine genauere Erläuterung der theoretischen Grundlagen und die Beschreibung eines hierfür entwickelten Rechenprogramms sind einer - in Vorbereitung befindlichen - weiteren Arbeit zu entnehmen, die die Ergebnisse eigener Untersuchungen mit den wesentlichen Teilen der beiden obengenannten Forschungsvorhaben zusammenfaßt [8].

## 1.2 Zielsetzung

In der vorliegenden Arbeit soll das Trag- und Verformungsverhalten vierseitig gehaltener Stahlbetonwände unter ausmittiger einachsiger Belastung studiert werden. Hierfür werden unter Berücksichtigung wirklichkeitsnaher Werkstoffgesetze und Verformungen nach Theorie II. Ordnung Traglastrechnungen an entsprechend gewählten Trägerrosten iterativ durchgeführt, wobei die Biege- und Torsionssteifigkeiten dem jeweiligen Last-Verformungszustand angepaßt werden. Zur Bestätigung der rechnerischen Ergebnisse werden eigene Versuchsergebnisse herangezogen. Darüberhinaus werden die in [5] enthaltenen - nach dem Näherungsverfahren nach [4] erzielten - Ergebnisse überprüft. Schließlich werden Vergleiche mit dem in [1] empfohlenen Ersatzstabverfahren angestellt. Anhand dieser Überprüfungen wird kritisch erörtert, wie die Ergebnisse beider Verfahren im Vergleich zu den Versuchsergebnissen liegen und ob ggf. für die Näherungslösung nach DIN 1045 ein verbessertes Verfahren gewählt werden muß.

Das Trag- und Verformungsverhalten von Stahlbetonwänden wird eingehend an Hand von Parameterstudien erhärtet. Die beschriebene Analyse des Trag- und Verformungsverhaltens soll zeigen, welche Möglichkeiten bei der konstruktiven Durchbildung vierseitig gehaltener Wände zur optimalen Ausnutzung der Tragreserven bestehen bzw. in welcher Weise die Traglast gesteigert werden kann.

Außer den Angaben über die Traglast sollen Hinweise über die Größe der im Gebrauchs- und im rechnerischen Bruchzustand auftretenden Verformungen und über die Steifigkeits- und Schnittkraftumlagerung während der Laststeigerung bis zum Erreichen der Traglast gegeben werden.

---

### 1.3 Zur Definition von Wänden

Nach [1] sind Wände überwiegend auf Druck beanspruchte, scheibenartige Bauteile. Sie stellen neben Stützen und Rahmen im Stahlbetonbau ein weiteres lotrechtes Tragelement dar, das jedoch - im Gegensatz zu den beiden erstgenannten - in der Theorie und im Versuch bisher kaum behandelt wurde; die Ursache hierfür liegt in erster Linie an der in der Regel geringen Ausnutzung von Scheibentragwerken. In jüngerer Zeit erkennbar gewordene Entwicklungen - d.h. stets größer werdende Schlankheiten und die Ausnutzung größerer Lastausmitten - geben jedoch zu Untersuchungen Anlaß, die eine genauere Berücksichtigung des tatsächlichen Trag- und Verformungsverhaltens zum Ziele haben sollten.

Für Wände allgemein gilt die Unterscheidung in

- a) tragende Wände zur Aufnahme lotrechter und waagerechter Lasten
- b) aussteifende Wände, die zur Stützung der tragenden Wände herangezogen werden, und
- c) nichttragende Wände, die durch ihr Eigengewicht beansprucht werden und u.U. lastverteilende und aussteifende Aufgaben erhalten.

Mit zunehmender Schlankheit und Ausmitte gewinnt die Frage der Stützung einer Wand an Bedeutung. Je nach Auswahl der rechtswinklig zur Wandebene unverschieblich gehaltenen Ränder unterscheidet man in zwei-, drei- oder vierseitig gehaltene Wände.

Die nachfolgenden Untersuchungen beziehen sich auf vierseitig gehaltene, tragende Wände mit lotrechten, parallel zur Wandebene angreifenden Lasten.

#### 1.4 Berechnungsmethoden für ausmittig belastete schlanke Wände und Literaturüberblick

Nach den Ausführungen in Abschnitt 1.3 sollen hier vorwiegend nur solche Berechnungsmethoden erörtert werden, die außer der Scheibentragwirkung auch die Plattentragwirkung zu berücksichtigen vermögen, um in dieser Weise den Belangen von schlanken, ausmittig belasteten - und somit stabilitätsgefährdeten - Stahlbetonwänden Rechnung zu tragen.

In [1] wurden für schlanke, ausmittig beanspruchte Beton- und Stahlbetonwände ideale Schlankheiten nach der Elastizitätstheorie in Abhängigkeit von den Lagerungsbedingungen der Ränder angegeben. Bemessung und Stabilitätsnachweis erfolgen an Hand der für Stützen entwickelten Verfahren am Ersatzsystem. Es werden Beiwerte  $\beta$  angegeben, die es ermöglichen, die Knicklänge an folgender Form zu ermitteln:

$$h_k = \beta \cdot h_s.$$

Die  $\beta$ -Werte sind dabei unabhängig von der Bewehrung. Sie sind in Abhängigkeit von den Lagerungsbedingungen wie folgt zu wählen:

- a) zweiseitig gehaltene Wände

$$\beta = 1.0$$

- b) dreiseitig gehaltene Wände

$$\beta = \frac{1}{1 + \left[ \frac{h_s}{3b} \right]^2} \geq 0.3$$

- c) vierseitig gehaltene Wände

$$h_s \leq b: \quad \beta = \frac{1}{1 + \left[ \frac{h_s}{b} \right]^2} \quad h_s > b: \quad \beta = \frac{b}{2h_s}$$

Hierbei ist  $b$  der Abstand des freien Randes von der Mitte der aussteifenden Wand bzw. der Mittenabstand der aussteifenden Wände.

Für unbewehrte Wände gibt [2] ein Näherungsverfahren. Dabei sind unter Vernachlässigung von Betonzugspannungen errechnete Traglastkurven zur sicheren Seite hin durch Geraden ersetzt worden.



$$\text{zul. } N_{\lambda} = \text{zul. } N_{\lambda=0} \cdot \alpha$$

$$\alpha = 1 - \frac{\lambda}{140} \left( 1 + \frac{m}{3} \right) \quad \lambda \leq 70$$

$$\text{zul. } N_{\lambda=0} = \frac{1}{\gamma} \cdot F_b \cdot \beta_R \left( 1 - 2 \frac{e}{d} \right)$$

$$m = e/k$$

mit  $e/d \leq 0,3$  und  $\gamma = 2,5$  bzw.  $3,0$  je nach Betongüte.

In den osteuropäischen Ländern wurden in den vergangenen Jahrzehnten Wandkonstruktionen intensiv untersucht.

Umfangreiche Angaben über die Konstruktion und die Berechnung von schlanken Wänden findet man in [3]. Bis auf die Bewehrung gehen alle wichtigen Parameter in die Berechnung ein.

In [3] werden für die verschiedenen Lagerungsverhältnisse ausmittig belasteter Wände Diagramme zur Ermittlung von Abminderungsfaktoren  $\varphi$  angegeben, die den  $\alpha$ -Werten nach [2] entsprechen. Außer den Parametern Schlankheit, Ausmitte und Seitenverhältnis sind auch Festigkeits- und Verformungseigenschaften von Beton in diesen  $\varphi$ -Werten enthalten. Bei dem zu wählenden Sicherheitsbeiwert ist der Einfluß von Dauerlasten berücksichtigt. Neben der Trennung nach Beton und Stahlbeton wird auch jeweils zwischen Normal- und Leichtbeton unterschieden.

Die erwähnten von der Bewehrung unabhängigen Berechnungsmethoden sind insbes. bei schlanken, hoch belasteten Wänden sowohl mit tragender oder auch nur mit aussteifender Funktion nicht befriedigend und unwirtschaftlich. Bei schlanken Konstruktionen mit hohen Druckkräften besteht darüberhinaus in erhöhtem Maße die Gefahr des Versagens. Ein hinreichend genauer Stabilitätsnachweis kann in solchen Fällen nur unter Einbeziehung der Bewehrungsverhältnisse bzw. des Verformungsverhaltens von Stahlbetonscheiben geführt werden.

Den Verfassern ist bisher nur eine theoretische Untersuchung bekannt, in welcher die genannten Bedingungen von wirklichkeitsnahen Werkstoffgesetzen und Berücksichtigen der Verformungen nach Theorie II. Ordnung beachtet werden. [4]

Die wesentlichste Verbesserung gegenüber den vorher genannten Arbeiten besteht dabei in der Berücksichtigung der Bewehrung in Längs- wie in Querrichtung. Hierdurch kann auch einem orthotropen Tragverhalten, dessen Rolle Huber [7] im Hinblick auf die Schnittkraftverteilung bzw. auf das Verformungsverhalten eingehend erörtert, hinreichend Rechnung getragen werden.

In [4] wird für die Traglastermittlung von Wänden eine Näherungslösung ausgearbeitet. Die Näherung besteht in der Wahl des Ansatzes für die Biegeverformung. Die jeweils für eine gegebene Belastung zu ermittelnde kritische Gleichgewichtslage eines gewählten Wandstreifens wird mit Hilfe energetischer Betrachtungen auf iterativem Wege durch Variation der Wandschlankheit gewonnen. Als Ergebnis werden für spezielle Abmessungen und Bewehrungsverhältnisse Traglastdiagramme erstellt. In [5] wird mit diesem Verfahren eine Parameterstudie durchgeführt. Problematisch, vor allem im Zustand II, sind der gewählte Sinusansatz für die Verformungen und der in [5] als konstant angenommene Faktor  $\alpha$ , der in der Beziehung

$$Drill = \alpha \cdot \sqrt{K_x \cdot K_y}$$

die Größe der Drillsteifigkeit nach dem Huber'schen Ansatz beeinflusst.

Nach [7] ist bei Stahlbetonplatten i. Allg.

$$\alpha \geq 1,0$$

und nur im Sonderfalle der Isotropie  $\alpha = 1,0$  zu setzen; in [5] wurde  $\alpha = 0,6$  gewählt. Der Faktor kann dabei aus physikalischen Gründen keine konstante Größe sein; er ist vielmehr abhängig von Schlankheit und Ausmitte.

Versuchsergebnisse über ausmittig beanspruchte, mehrseitig gehaltene schlanke Stahlbetonwände sind bisher in der Literatur nicht zu finden. Für mittig belastete, vierseitig gehaltene Wände wurden Versuche an der Universität von Nebraska, USA, durchgeführt [15]. Es handelt sich hierbei

um 10 mittig belastete Wände mit kleinen Abmessungen. Versuchstechnische Aspekte dieser Serie wurden auch bei den eigenen Versuchen [6] an ausmittig belasteten Wänden berücksichtigt.

---

## 2. Berechnungsmethode

### 2.1 Allgemeine Beschreibung des Lösungsweges

Bei der Wahl einer geeigneten Lösungsmethode zur Traglastermittlung von schlanken Wänden wurde zweckmäßig von einem bereits vorhandenen hohen Wissensstand auf dem Gebiete ausmittig beanspruchter stabförmiger Stahlbetondruckglieder ausgegangen (A. u. a. [9]). Aus diesem Grunde wurden ausmittig belastete schlanke Systeme durch ein engmaschiges Netz längs- und querlaufender Stäbe ersetzt, die untereinander biegesteif verbunden sind (s. Bild 1). Um den Rechenaufwand nicht zu groß werden zu lassen, war zunächst eine gelenkige Verbindung der Stäbe untereinander vorgesehen - ein Verfahren, das von der Plattentheorie bekannt ist. Es zeigte sich jedoch sehr bald, daß die auf diese Weise ermittelten Traglasten gegenüber einer Berechnung unter Berücksichtigung der tatsächlichen Drillsteifigkeiten zu gering waren und somit zu sehr auf der sicheren Seite lagen.

---

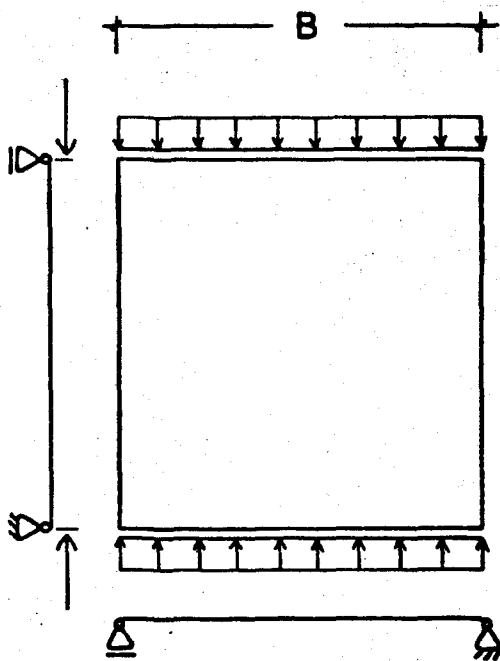


Bild 1a: ausmittig beanspruchte, allseits gelenkig gelagerte Wand

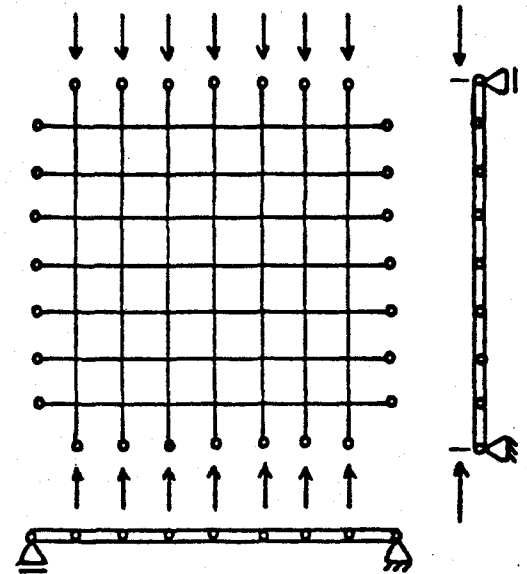


Bild 1b: drillsteifer Trägerrost als Ersatzsystem

An dem drillsteifen Stabwerk (s. Bild 1) lassen sich auf iterativem Weg Verformungsrechnungen unter Berücksichtigung der Theorie II. Ordnung und der Nichtlinearität der Werkstoffe Beton und Stahl durchführen, wobei in der vorliegenden Arbeit die allseits gelenkig gelagerte Wand mit Torsionseinspannung an den Rändern im Vordergrund der Untersuchungen steht. Die mittels einer elektronischen Rechenanlage am oben erläuterten Ersatzsystem durchgeführten Rechnungen liefern die zu den Beanspruchungen gehörenden Verformungszustände. Das nichtlineare Werkstoffverhalten wird dadurch berücksichtigt, daß die zu jedem Last-Verformungszustand über die Auswertung von Momenten-Krümmungsbeziehungen für die einzelnen Teilstücke Ersatzbiegesteifigkeiten und entsprechende Torsionssteifigkeiten ermittelt werden. Ist nach Laststeigerung kein Gleichgewichtszustand mehr möglich, so liegt entweder Materialbruch oder Stabilitätsversagen ohne Gleichgewichtsverzweigung vor.

## 2.2 Definition der Traglast

Das verwendete Rechenverfahren ist ein Näherungsverfahren, das als Traglast nicht das Eintreten des System-Kollaps, sondern das Erreichen eines näher zu definierenden Grenzzustandes bezeichnet. Der Grenzwert ist durch zwei Bedingungen festgelegt :

- a) Erreichen von vorgegebenen Randdehnungen auf der Betondruck- oder auf der Stahlzugseite (Materialbruch).
- b) Erreichen der Stabilitätsgrenze; die äußeren Schnittgrößen wachsen bei einer differentiellen Laststeigerung schneller als die inneren aufnehmbaren Kräfte (Stabilitätsversagen).

Da es sich beim - als System angenommenen - Trägerrost um ein vielfach statisch unbestimmtes System handelt, sind bzgl. der Definition des Grenzzustandes besondere Überlegungen anzustellen.

Im Gegensatz zum Einzelstab tritt nämlich ein völliger Zusammenbruch des Systems erst ein, wenn größere Bereiche versagen. Betrachtet man z. B. das in Bild 1 skizzierte Ersatzsystem für die Ermittlung von Wandtraglasten, so wird klar, daß das System auch nach dem Eintreten des Fließens im normalkraftfreien Querstab seine Traglast noch nicht erreicht hat, da der Längsstab in diesem Zustand noch weiter trägt. Es erscheint daher sinnvoll, bei den Traglastberechnungen ein Fließen in Querrichtung zuzulassen und den Grenzwert nur auf die überdrückten Längsstäbe zu beziehen. Im Abschnitt 2.5 werden die Möglichkeiten für eine derartige Traglastuntersuchung behandelt.

---

## 2.3 Rechenannahmen

Neben der Definition der Traglast müssen weitere vereinfachende Annahmen getroffen werden, die es erlauben, die Berechnungen mit einem erträglichen Aufwand durchzuführen.

---

a) System und Querschnitt

Es werden nur rechtwinklige Systeme mit biege- u. torsionssteifer Verbindung an den Kreuzungspunkten untersucht. Die Stäbe besitzen einen symmetrisch bewehrten Rechteckquerschnitt, wobei das Überdeckungsmaß generell zu  $h'/d = 0,10$  angenommen wird. Es bereitet keine Schwierigkeiten, mit unsymmetrischer Bewehrung und unterschiedlicher Überdeckung zu rechnen.

b) Belastung

Der Trägerrost wird nur in lotrechter Richtung durch ausmittige Normalkräfte beansprucht. Es wird angenommen, daß die Querrichtung normalkraftfrei bleibt. Es handelt sich um Kurzzeitbelastungen.

c) Werkstoffeigenschaften

Längenänderungen der Achsen infolge Normalkraftbeanspruchung und Schubverformungen werden nicht berücksichtigt. Neben kleinen Verzerrungen und der Annahme des Ebenbleibens der Querschnitte gelten folgende weitere Vereinbarungen :

An den Rändern wird keine Dehnungsbehinderung vorausgesetzt. Eine Querkontraktion wird nicht in Ansatz gebracht. Für die Spannungsdehnungsbeziehungen werden die Werkstoffgesetze der DIN 1045 gewählt.

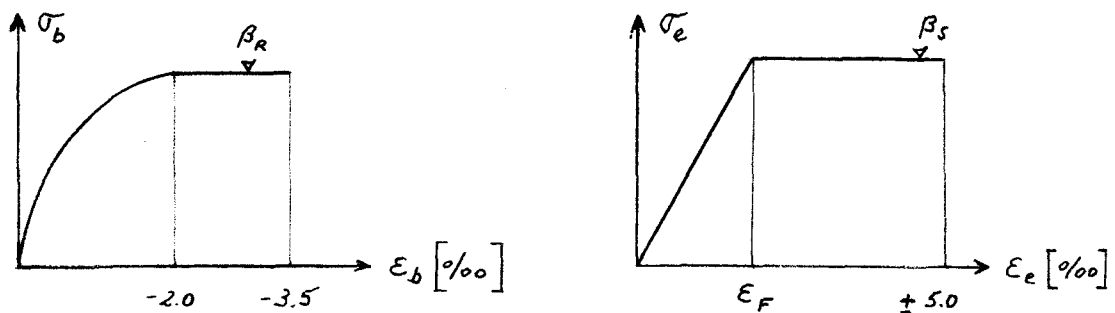


Bild 2 : Spannungs-Dehnungsbeziehungen für den Beton und den Stahl

Die Zugfestigkeit des Betons bleibt in Längsrichtung außer Ansatz; in Querrichtung wird sie berücksichtigt, da der Einfluß infolge der nicht vorhandenen Normalkraft von Bedeutung ist. In beiden Fällen wird ein Mitwirken des Betons zwischen den Rissen vernachlässigt.

d) Steifigkeitsannahmen

Zwischen den Verbindungspunkten der Teilstäbe (Bild 1) werden konstante Steifigkeiten in beiden Richtungen angenommen.

Bei der Bestimmung der Querbiegesteifigkeiten wird die Momenten-Krümmungsbeziehung unter Verzicht auf die Ausnutzung der Bruchkrümmung  $K_u$  durch eine Parabel 3. Ordnung angenähert. (Bild 3)

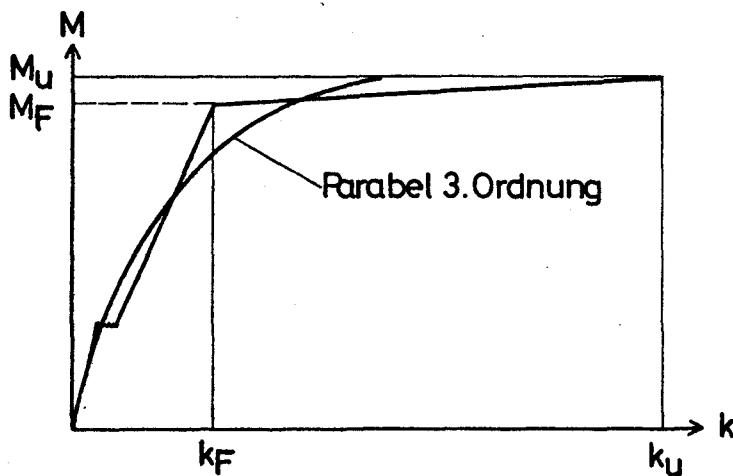


Bild 3 : Annäherung der  $M$ - $k$ -Beziehung in Querrichtung durch eine Parabel 3. Ordnung

## 2.4 Lösungsmethode

Um eine Verformungsrechnung durchführen zu können, sind die elastizitätstheoretischen Gleichungen zur Ermittlung der Schnittkräfte und Verformungen für einen biege- und torsionssteifen Trägerrost aufzustellen. Zur Lösung des Problems wird die Deformationsmethode verwendet. Am System greifen nur solche Kräfte an, die den Trägerrost in seiner Ebene beanspruchen (Bild 4).

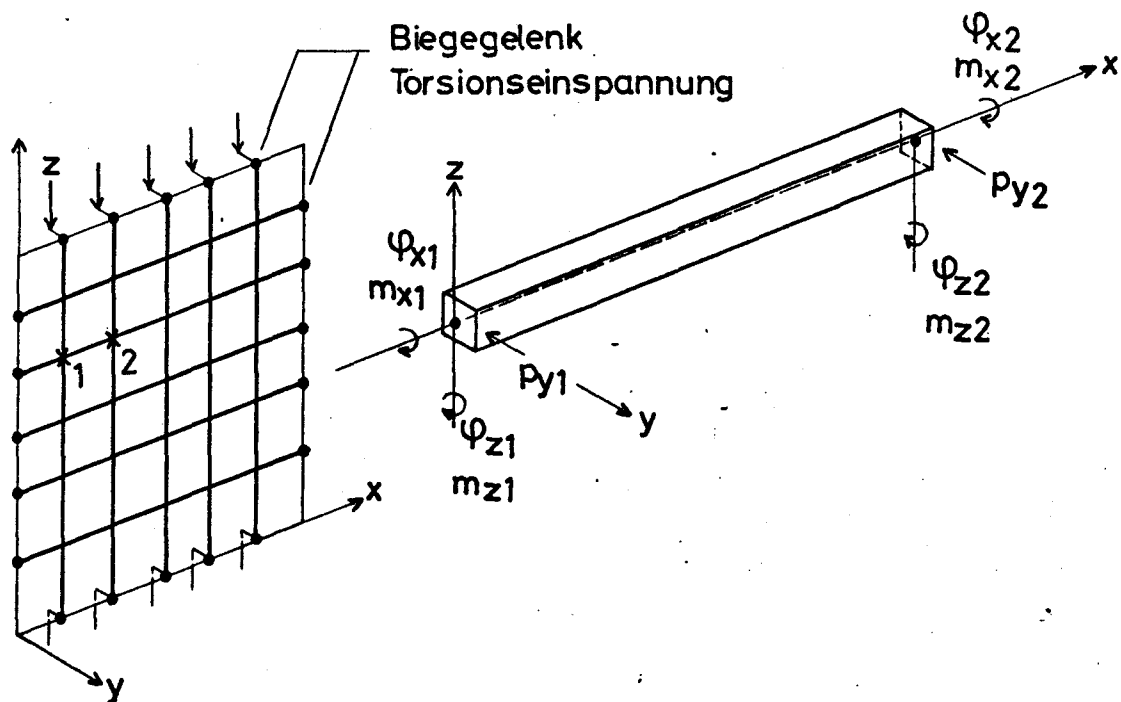


Bild 4: Teilstab 1 - 2

mit angreifenden Kräften und Momenten

Bei Anwendung der Deformationsmethode werden als linear unabhängige Einheitsverformungszustände Knotenverdrehungen und Stabdrehungen angesetzt. Wegen Vernachlässigung der elastischen Längsverformungen



lassen sich die Knotenverschiebungen auf einfache Weise durch die Stabdrehwinkel ausdrücken. Dadurch wird die Zahl der Unbekannten relativ klein gehalten.

Die Aufbereitung der Ergebnisse in eine computergerechte Form läßt sich am besten mit der Darstellung in Matrizenschreibweise erreichen. Beim Weggrößenverfahren kann der Zusammenhang zwischen Beanspruchungen und Verformungen eines Systems allgemein wie folgt angegeben werden:

$$\underline{p} = \underline{K} \cdot \underline{v}$$

$\underline{p}$  = Last<sup>v</sup>vektor des Gesamtsystems  
=

$\underline{K}$  = symmetrische Steifigkeitsmatrix  
=

$\underline{v}$  = Verformungsvektor  
=

Sowohl die Quer- als auch die Längsstäbe des Trägerrostes sind frei von Querlasten und weisen somit nach Th. I. Ordnung zwischen den Knotenpunkten einen linearen Momentenverlauf auf. Damit ist es nach Chwalla [10] möglich, die Lösungsform auch für die druckbeanspruchten Längsstäbe bei Berücksichtigung von Theorie II. Ordnung beizubehalten. Mit den Bezeichnungen nach Bild 4 und den Abkürzungen

$$A = \frac{EJ}{1} \cdot \frac{\epsilon \cdot \sin \epsilon - \epsilon^2 \cdot \cos \epsilon}{2(1 - \cos \epsilon) - \epsilon \cdot \sin \epsilon}$$

$$B = \frac{EJ}{1} \cdot \frac{\epsilon^2 - \epsilon \cdot \sin \epsilon}{2(1 - \cos \epsilon) - \epsilon \cdot \sin \epsilon}$$

$$C = A + B$$

$$\epsilon = \sqrt{P/EI}$$

lauten die Gleichungen für einen Längsstab in Matrizen-Schreibweise:

$$\begin{aligned}
 \begin{matrix} m_{x1} \\ p_{y1} \\ m_{z1} \end{matrix} &= \begin{bmatrix} GI/l & 0 & 0 \\ 0 & (2C/l^2 - P/l) & C/l \\ 0 & C/l & A \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varphi_{x1} \\ y_1 \\ \varphi_{z1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -GI/l & 0 & 0 \\ 0 & (-2C/l^2 + P/l) & C/l \\ 0 & -C/l & B \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varphi_{x2} \\ y_2 \\ \varphi_{z2} \end{bmatrix} \\
 \\ 
 \begin{matrix} m_{x2} \\ p_{y2} \\ m_{z2} \end{matrix} &= \begin{bmatrix} -GI/l & 0 & 0 \\ 0 & (-2C/l^2 + P/l) & -C/l \\ 0 & C/l & B \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varphi_{x1} \\ y_1 \\ \varphi_{z1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} GI/l & 0 & 0 \\ 0 & (2C/l^2 - P/l) & -C/l \\ 0 & -C/l & A \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varphi_{x2} \\ y_2 \\ \varphi_{z2} \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

Da in den in beschriebener Weise aufzustellenden Gleichungen alle Kräfte und Momente auf Verschiebungs- und Verdrehungsgrößen zurückgeführt werden, liefern die Gleichgewichtsbedingungen an den Knotenpunkten mit den dort eingeleiteten Kräften und Momenten ein System linearer Gleichungen.

Eine explizite Bestimmung der Verschiebungsgrößen und der Schnittkräfte gelingt aber im vorliegenden Fall nicht, da die mit den Stabverdrehungen verknüpften Axialkräfte auch in den Steifigkeitswerten enthalten sind. Die strenge Auflösung solcher - in den Stabkräften nichtlinearen - Gleichungssysteme erfolgt hier auf iterativem Wege für jede Laststufe. Es ist angebracht, die Laststeigerungen mit einem genügend großen Abstand zur Traglast zu beginnen, um die Änderung der Steifigkeiten je Laststufe klein zu halten.

Durch das Einführen der wirksamen Stabsteifigkeiten unter Berücksichtigung der tatsächlichen Momenten-Krümmungsbeziehung ist das nichtlineare Verformungsproblem in eine Form gebracht worden, die es ermöglicht, bekannte Rechenmethoden der E-Theorie

anzuwenden. Das Weggrößenverfahren eignet sich im besonderen Maße für diesen Zweck. **Der Verfasser hat ein elektronisches Rechenprogramm in Fortran IV entwickelt, das bei automatischer Laststeigerung Traglasten für die vorliegenden Systeme errechnet.**

## 2.5 Diskussion der Versagenskriterien

Wie schon im Abschnitt 2.3 angedeutet, ist die Tragfähigkeit des zu untersuchenden Stab- bzw. Wandsystems noch nicht mit dem Erreichen eines Grenzzustandes in einem normalkraftfreien Querschnitt erschöpft. Momenten-Krümmungsbeziehungen und Versuchsergebnissen ist zu entnehmen, daß zu diesem Zeitpunkt im Querschnitt ein nahezu konstantes Moment übertragen wird.

Aus diesem Grunde mußten Wege gesucht werden, diesen Zustand in der Rechnung durch geeignete Maßnahmen zu berücksichtigen.

Eine Möglichkeit besteht darin, beim Erreichen des Grenzzustandes in einem Querstab an dieser Stelle ein Fließgelenk anzunehmen, was durch Einführung eines konstanten äußeren Momentes in der Größe des Fließmomentes geschehen kann:

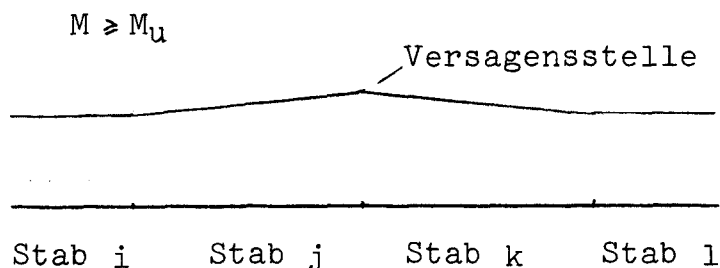


Bild 5a: Momentenverlauf beim Versagen

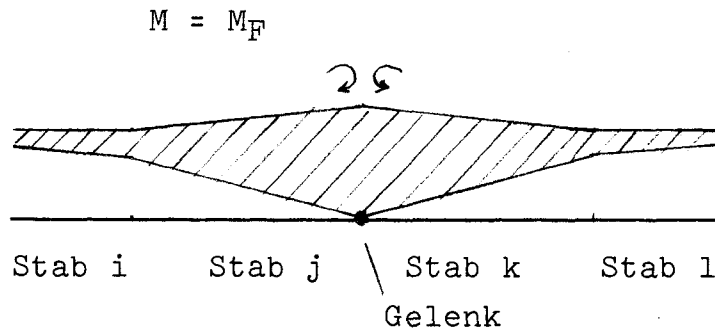


Bild 5b: Momentenverlauf nach Aufbringen eines Doppelmomentes

Programmiertechnisch bietet diese Lösung keine Schwierigkeiten. Nach dem Versagen entsteht ein neues System mit abgewandelter Gesamtsteifigkeitsmatrix und zusätzlichem äußeren Moment an der versagenden Stelle. Bei einem symmetrischen System mit drei Querstäben kann sich bei fortschreitendem Versagen z.B. folgende Systemänderung mit zugehörigem Momentenverlauf einstellen:

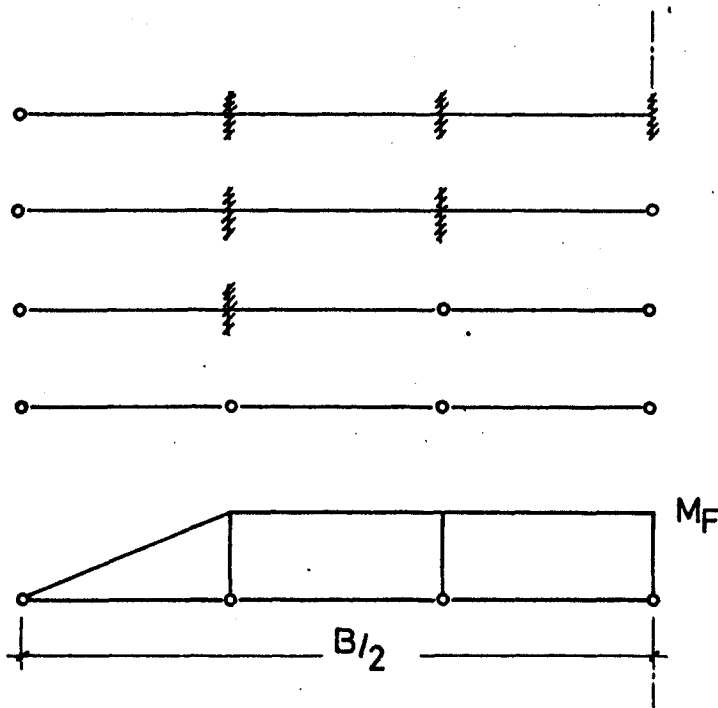


Bild 6: Fortschreitendes Versagen an einem Querstab mit 3 Teilstäben (Längsstäbe nicht dargestellt)

In Querrichtung entsteht zwar in dieser Weise eine Gelenkkette. Es werden jedoch weiterhin Momente übertragen, so daß nicht nur in Längstragrichtung die volle Last abgetragen werden muß.

In dieser Weise durchgeführte Rechnungen wiesen häufig Konvergenzschwierigkeiten infolge zu großer Systemsteifigkeitsänderungen auf. Beim Einführen von Gelenken können außerdem zu große Sprünge in den Verformungen auftreten, die zur Divergenz der Iteration führen.

Die zweite Methode besteht in einer allmählichen Steifigkeitsabminderung: Querstäbe im Grenzzustand erhalten eine Stabsteifigkeit, mit welcher im betreffenden Stab ein Moment von der Größenordnung des Fließmoments erzeugt wird. Diese Methode enthält grundsätzlich keine numerischen Schwierigkeiten. Sie erfordert allerdings in einigen Fällen eine weitere Iteration zur Anpassung der Steifigkeiten. Entsprechend dem guten Konvergenzverhalten wurde dieser zweite Weg für die weiteren Berechnungen gewählt.

## 2.6 Berücksichtigung der Torsionssteifigkeiten

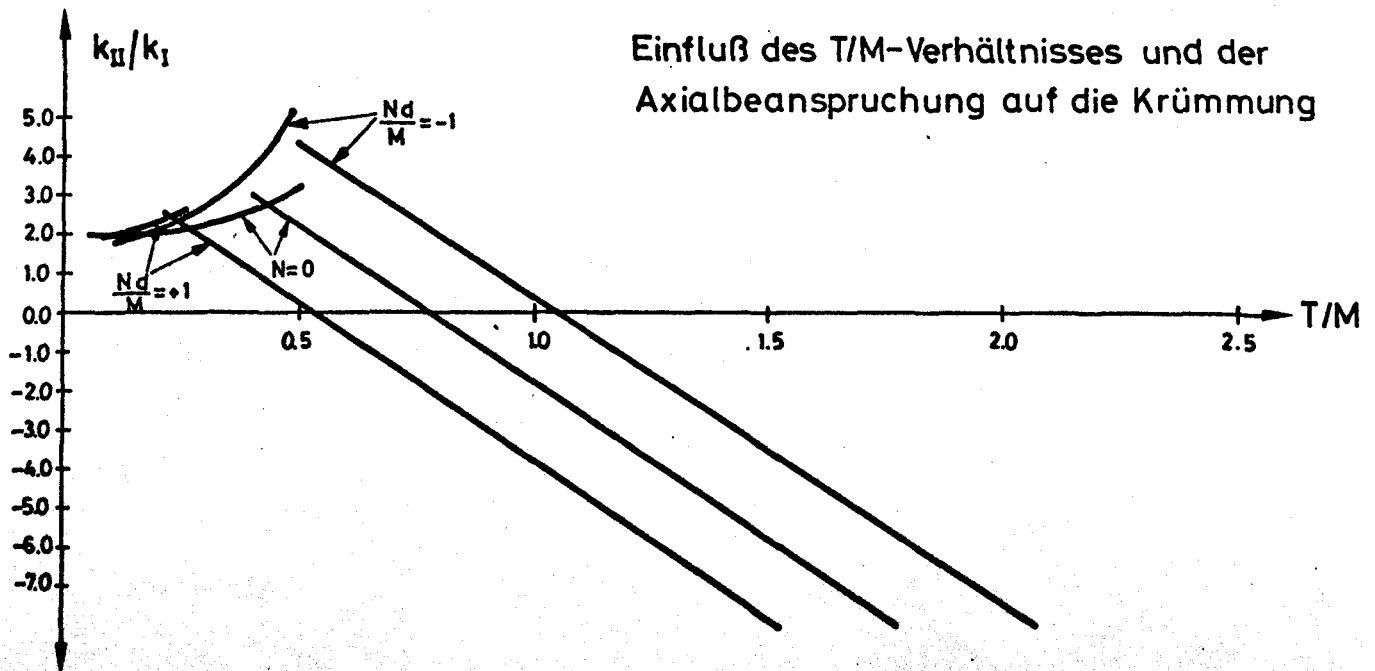
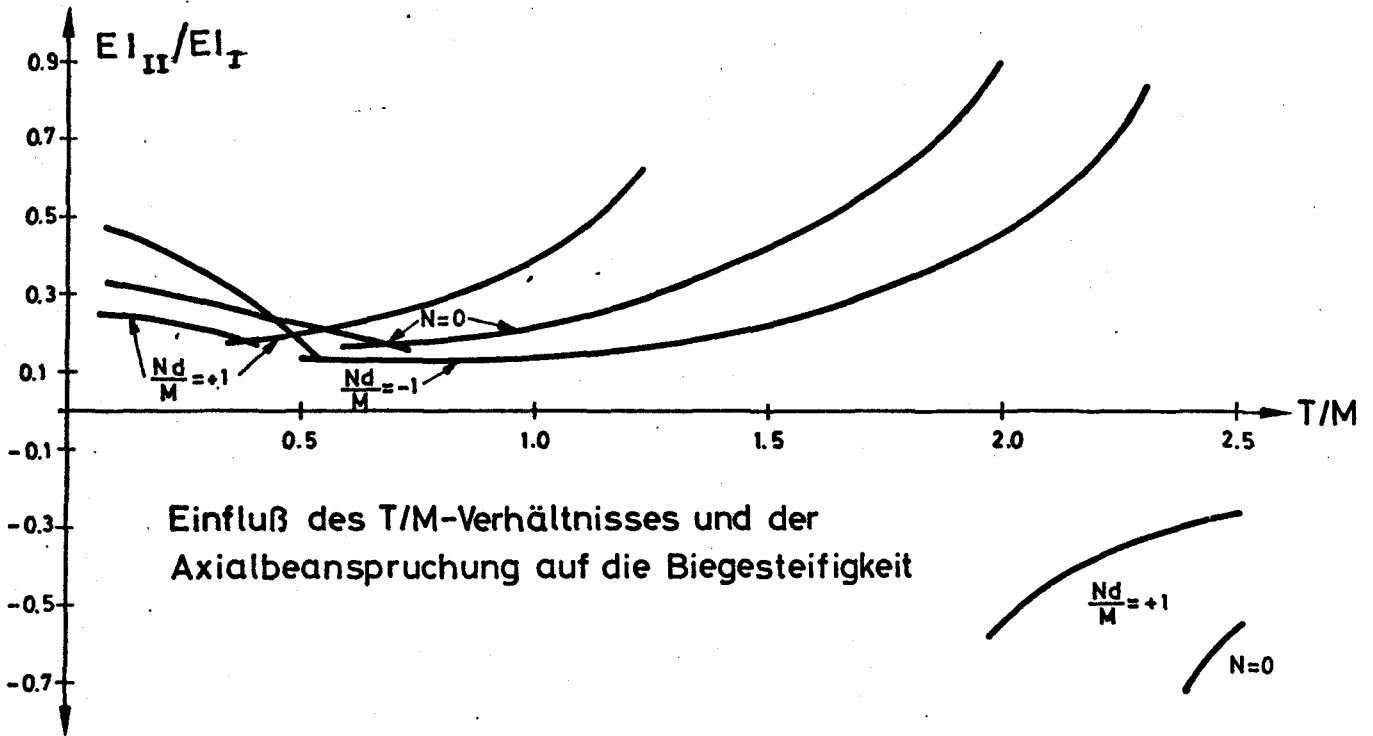
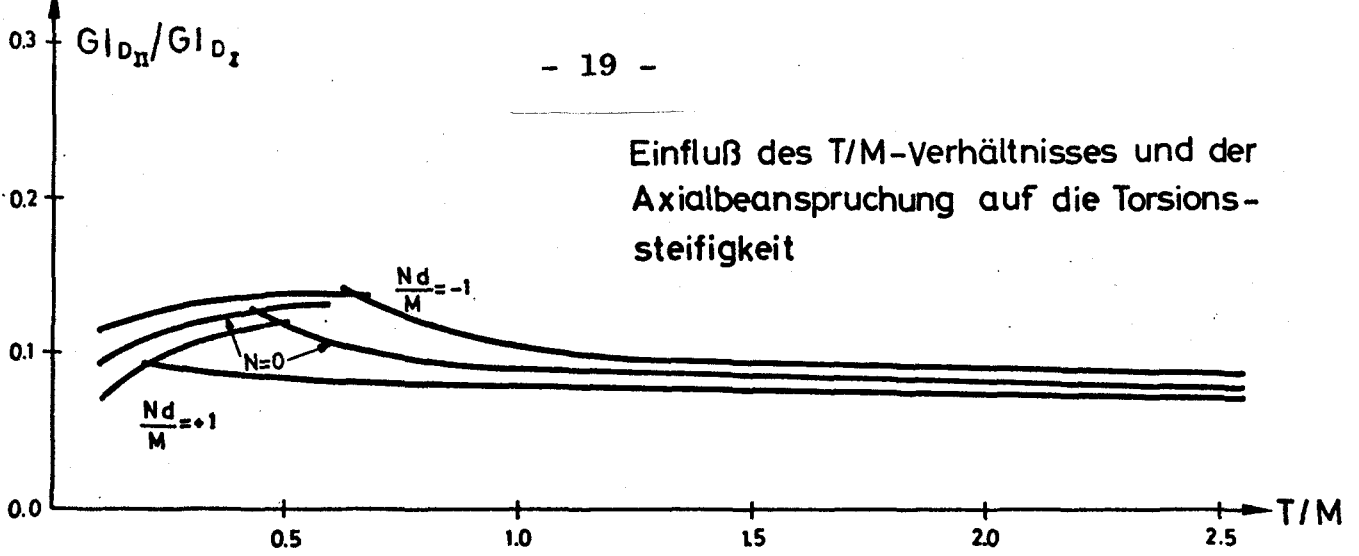
Zur Erfassung des Einflusses der Drillsteifigkeit auf die Traglasten bieten sich u.a. folgende Möglichkeiten:

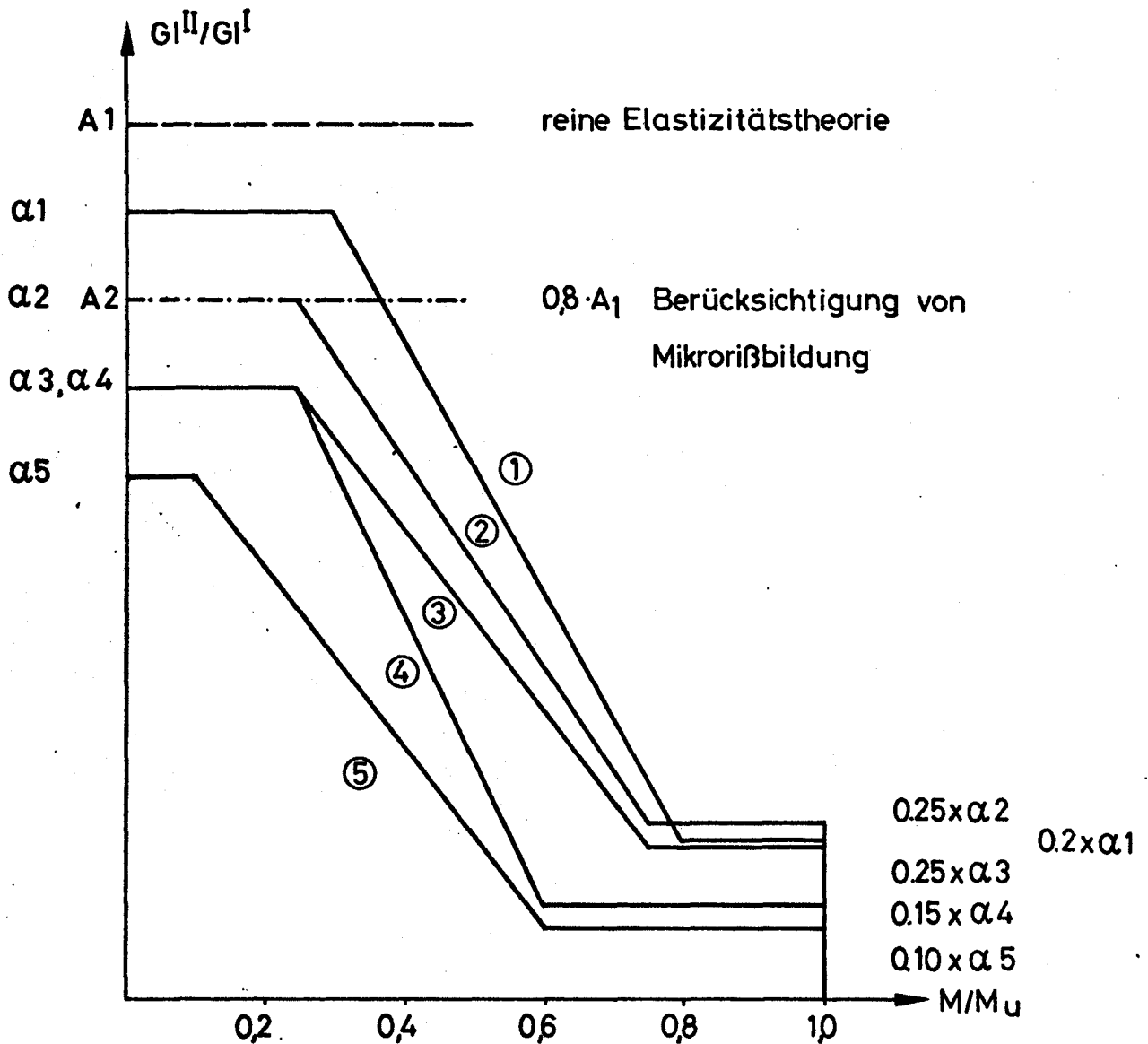
- a) genaue Ermittlung der zu den einzelnen Last-Verformungszuständen gehörenden Drillsteifigkeiten durch Auswerten von  $T-\theta$ - (Torsionsmomenten-Verdrillungs-) Beziehungen.
- b) näherungsweise Berechnung von biegebeanspruchungsabhängigen Torsionssteifigkeiten an Hand empirischer Daten.

Beide Wege ermöglichen eine iterative Verformungsrechnung eines torsionssteifen, ausmittig belasteten Trägerrostes nach der in Abschn.2.4 beschriebenen Methode.

Verfolgt man den erstgenannten Weg, so können entsprechend den wirksamen Biegesteifigkeiten zu jedem Last-Verformungszustand "wirksame Drillsteifigkeiten" entwickelt werden. Im gleichen Rechenschritt, in welchem die  $M-\kappa$ -Beziehung dem jeweiligen Beanspruchungszustand angepaßt wird, könnte dann auch die  $T-\theta$ -Funktion ausgewertet werden.

Die Schwierigkeit bei diesem Verfahren besteht allerdings nicht auf rechentechnischem Gebiet, sondern in der Beschaffung der hierfür erforderlichen Versuchsdaten. Es gibt zwar eine Anzahl von Arbeiten, die sich mit reiner Torsion ( $T$ ) oder kombinierter Beanspruchung von Biegung ( $M$ ), Querkraft ( $Q$ ) und Normalkraft infolge Vorspannung ( $N_V$ ) beschäftigen, jedoch sind Versuchsergebnisse, bei denen eine äußere Normalkraft ( $N$ ) mit einbezogen ist, kaum bekannt ( $[11]$   $[12]$  u.  $[13]$ ). Aus den wenigen Arbeiten läßt sich erkennen, daß die  $M-\kappa$  und  $T-\theta$ -Beziehungen nicht unabhängig voneinander sind.

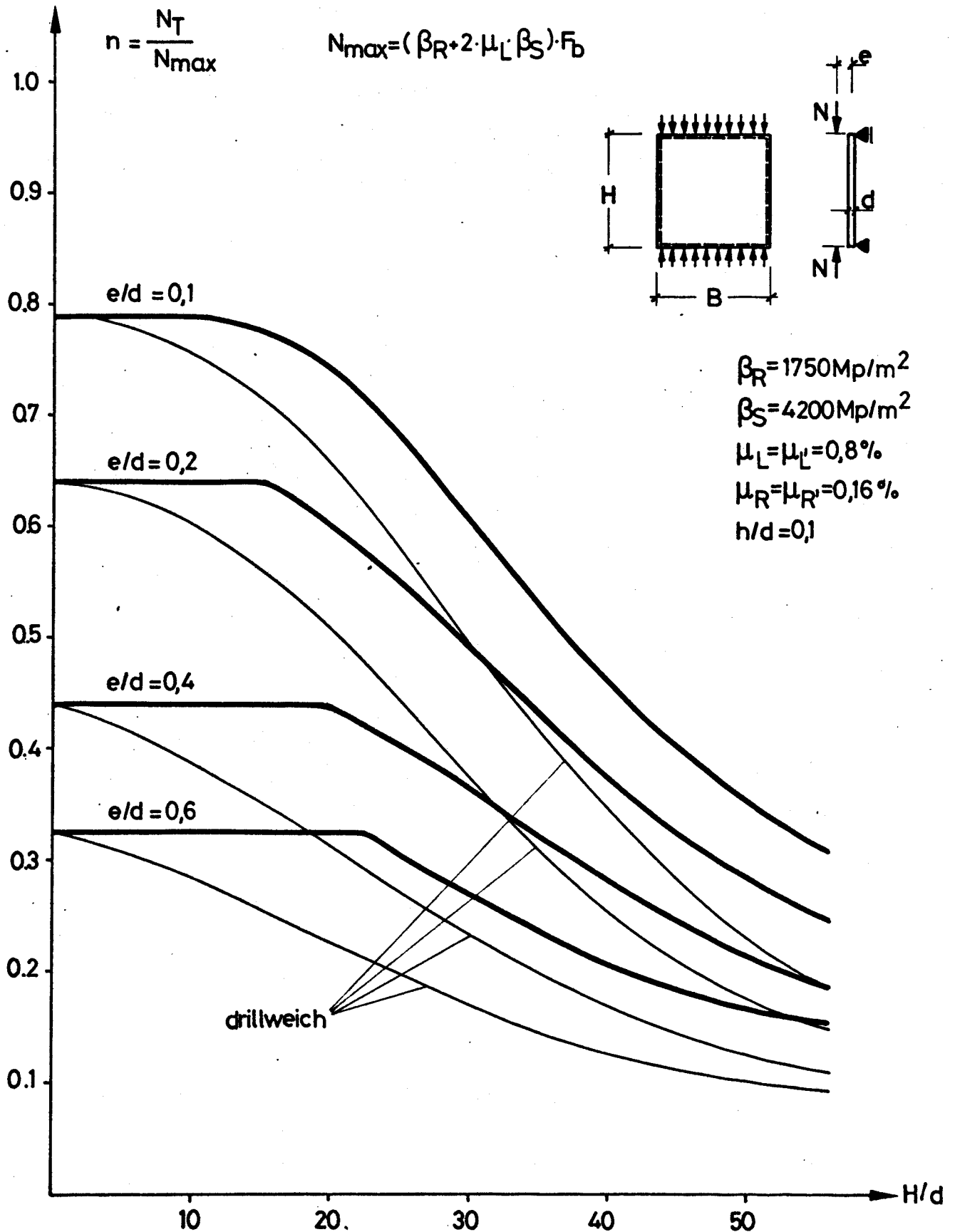




Abnahme der Torsionssteifigkeit als  
Funktion der Biegemomentenbeanspruchung

Planungs-Engineering-Service GmbH, Berlin, 1998  
in Abhängigkeit von Schnittgröße und Ausmittigkeit





Bezogene Traglasten einer drillsteifen Stahlbetonwand  
in Abhängigkeit von Schlankheit und Ausmitte

Die Krümmungen und damit auch die Biegesteifigkeiten sind stark veränderlich mit dem Verhältnis  $T/M$  (s. Bild 7), ebenso das Verhältnis  $GI_D/GI_{DI}$ . Die diesbezüglichen Angaben reichen für eine systematische Erfassung noch nicht aus und sind durch Versuche noch nicht genügend abgesichert.

Unter diesen Umständen ist daher festzustellen, daß sich der relativ große Aufwand in Anbetracht des nur geringen Datenumfanges kaum lohnt.

Das Näherungsverfahren des zweitgenannten Weges zur Berücksichtigung der Drillsteifigkeit kann anhand der Ergebnisse der im hiesigen Institut durchgeführten Wandversuche entwickelt werden. Versuchsnachrechnungen haben nämlich gezeigt, daß es unter Berücksichtigung der aus der Literatur bekannten oberen und unteren Grenzwerte für die Torsionssteifigkeiten von Stahlbetonstabwerken möglich ist, einen von der Biegebeanspruchung abhängigen Steifigkeitsverlauf vorzugeben, der das Verformungsverhalten solcher Wände unter Normalkraft, Biegung und Torsion im Mittel gut charakterisiert.

Unter Berücksichtigung des starken Abfalls der Torsionssteifigkeit beim Übergang in den Zustand II werden zunächst obere und untere Grenzwerte dieser Steifigkeiten  $G.I$  für den Zustand I und den Zustand II festgelegt (Bild 8). Entsprechend den Empfehlungen (s. [14]) wird dabei bereits für den ungerissenen Zustand eine 10%ige Abminderung wegen evtl. Mikrorißbildung als oberer ( $\alpha_1$ ) und 75% des nach [14] empfohlenen Wertes ( $\alpha_5$ ) als unterer Grenzwert angenommen. Die Steifigkeiten für den Zustand II werden zwischen 0,1 und 0,25 der jeweiligen Ausgangswerte gewählt. Der zur Vereinfachung linear angenommene Steifigkeitsabfall beginnt im Bereich  $0,1 M/M_u - 0,3 M/M_u$  und endet zwischen  $0,6$  und  $0,8 M/M_u$ . Versuchsnachrechnungen zeigten, daß ein im oberen Drittel des durch die obigen Werte festgelegten Bandes liegender Steifigkeitsverlauf angemessen erscheint. Die in Bild 9 wiedergegebenen sowie bei einem Teil der Parameterstudien ermittelten Traglasten wurden mit einem Torsionssteifigkeitsverlauf ermittelt, der der Funktion (2) in Bild 8 entspricht.

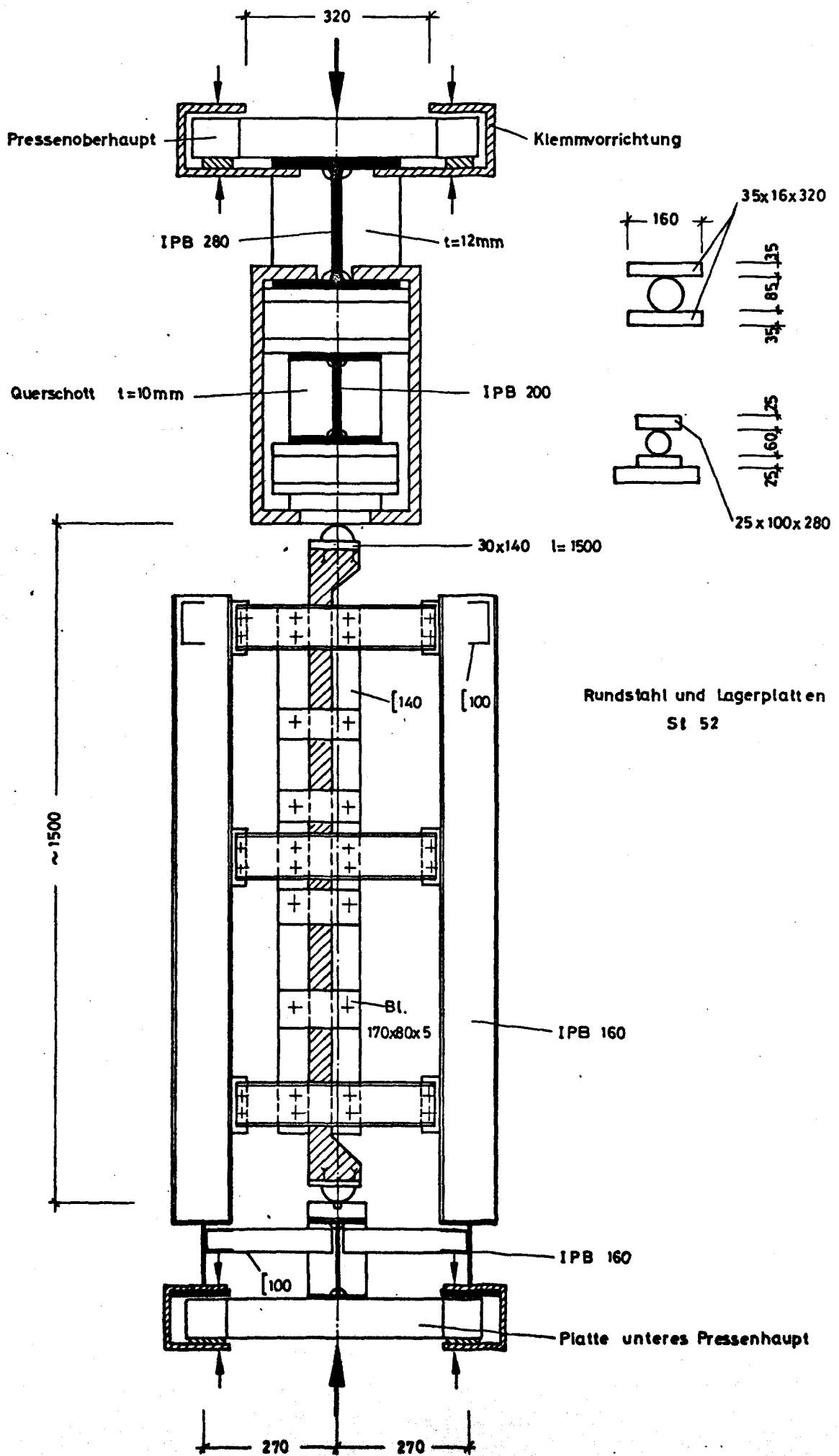
Bild 9 zeigt die bezogenen Traglasten von vierseitig gelenkig gelagerten, ausmittig beanspruchten Stahlbetonwänden mit  $\mu_L = \mu_L' = 0,8\%$  und  $\mu_Q = \mu_Q' = 0,16\%$ . Gleichzeitig sind die am System eines drillweichen Trägerrostes ermittelten Traglasten mit dünner Linie eingezeichnet. Hieraus ist deutlich zu erkennen, welche Rolle einer wirklichkeitsnahen Annahme der Torsionssteifigkeiten zukommt.

### 3. Berechnung der im Versuch geprüften Wände mit Gegenüberstellung der experimentellen und rechnerischen Ergebnisse

#### 3.1 Überblick

In den Jahren 1971 und 1972 wurden am Institut für Baustoffkunde und Stahlbeton der T.U. Braunschweig sechs Kurzzeitversuche an Stahlbetonwänden im Modellmaßstab 1 : 2,5 durchgeführt. Über diese Versuche liegt ein ausführlicher Forschungsbericht vor [6]. Die quadratischen, vierseitig gelenkig gelagerten Wände waren orthogonal bewehrt und standen unter einachsiger, ausmittiger Belastung. Variiert wurden die Parameter Schlankheit und Ausmitte. Zur Aufnahme der horizontalen Kräfte an den lotrechten Seitenwänden wurde eine Stahlhilfskonstruktion verwendet (s.Bild 10). Die Last wurde über statisch bestimmt auf Rollen gelagerte Stahlträger als Linienlast über die ganze Wandbreite aufgebracht. Für die stufenweise Belastung bis zum Bruch stand eine 600 Mp Presse zur Verfügung.

Die Abmessungen, Ausmitten und Bewehrungsprozentsätze wurden u. a. so gewählt, daß schon vorhandene theoretische Ergebnisse überprüft werden konnten. Ziel der Versuche war in erster Linie die Ermittlung von Traglasten unter Kurzzeitbelastung. Gleichzeitig sollte aber auch das allgemeine Tragverhalten bis zum Bruch unter Beobachtung des Rißbildes während der einzelnen Laststufen verfolgt werden.



Wand Nr.	1	2	3	4	5	6
Würfelfestigk. $\beta_w$ vers [kp/cm <sup>2</sup> ]	342	286	286	319	248	312
Prismenfestigk. $\beta_p$ vers [kp/cm <sup>2</sup> ]	315	240	235	273	213	237
Biegezugfestigk. n. 28 Tagen [kp/cm <sup>2</sup> ]	45	39	34	38	31	38
Spaltzugfestigk. n. 28 Tagen [kp/cm <sup>2</sup> ]	30	22	17	24	15	15
E-Modul n. 28 Tagen [kp/cm <sup>2</sup> ]	267000	251000	252000	265000	269000	279000
Betonalter am Versuchstag	36	39	28	31	29	31
$\beta_s$ längs [kp/cm <sup>2</sup> ]	7950	7950	7950	7950	5460	5460
$\beta_s$ quer [kp/cm <sup>2</sup> ]	7950	7950	7950	7950	6640	6640
Längsbewehrg. je Seite [%]	0,56	0,56	0,56	0,56	0,52	0,52
Querbewehrg. je Seite [%]	0,14	0,14	0,14	0,14	0,11	0,11
Wanddicke [m]	0,050	0,050	0,050	0,050	0,075	0,075

T a b e l l e 1

### 3.2 Abmessungen, Baustoffkennwerte und Bewehrung

Alle wichtigen Daten der Versuchskörper sind Tabelle 1 zu entnehmen. Mit der gewählten Höhe  $H = 1,50$  m und den Wandstärken von  $d = 0,05$  bzw.  $0,075$  m ergaben sich bezogene Schlankheiten  $H/d = 30$  bzw.  $H/d = 20$ . Die Wanddicke von 5 cm erlaubte noch gerade eine beidseitige Längs- und Querbewehrung aus Baustahlmatten  $\phi 3$  mm bei Wand I bis IV bzw.  $\phi 4$  mm und  $\phi 5$  mm bei den Wänden V und VI.

Die Bewehrungsgrade der Längs- und Querrichtung verhielten sich ~ wie 5 : 1. Die im Vergleich zu den Rechnungen aus ausführungstechnischen Gründen geringer gehaltenen Bewehrungsprozentsätze wurden durch die vorliegenden höheren Stahlstreckgrenzen in etwa ausgeglichen.

### 3.3 Meßergebnisse

Neben der Ermittlung von Riß- und Bruchlasten wurden folgende Werte während der errechneten Laststufen gemessen.

- a) Durchbiegungen
- b) Endtangentenneigungen
- c) Betondehnungen bzw. -stauchungen mittels Dehnmeßstreifen und Setzdehnmesser
- d) Stahldehnungen bzw. -stauchungen mittels Setzdehnmesser

Von den umfangreichen Daten über diese experimentellen Untersuchungen sollen hier nur die Ergebnisse bezüglich der Traglasten wiedergegeben werden.

Die Riß- und Traglasten der einzelnen Versuchswände sind in Tabelle 2 zusammengestellt. Dabei soll unter Rißlast jene Last verstanden werden, unter der der erste sichtbare Riß beobachtet wurde.

Wand	H/d	e/d	Rißlast	Traglast	
			Mp	Mp	Mp/m
I	30	0,8	18	52	34,7
III	30	0,6	36	62	41,3
II	30	0,4	35	78	52,0
IV	30	0,2	56	140	93,3
V	20	0,6	54	85	56,7
VI	20	0,3	90	176	117,2

T a b e l l e 2 : Riß- und Traglasten

Als Traglast wurde die Höchstlast definiert.

Um die Versuchswerte Traglastdiagrammen zuordnen zu können, werden die Traglasten unter Berücksichtigung der am Versuchstage ermittelten Baustoffkennwerte (s. Tabelle 1) auf ihren jeweiligen Maximalwert  $N_{\max}$  ohne Ausmitten- und Schlankheitseinfluß bezogen (s. Tabelle 3).

$$N_{\max} = (\beta_p + 2 \mu_s \cdot \beta_s) b d$$

Wand	$N_{\max}$ [Mp]	$N_T/N_{\max}$	$\sigma_F$ [kp/cm <sup>2</sup> ]
I	303,0	0,179	58,2
III	243,0	0,255	86,7
II	246,7	0,316	107,2
IV	271,5	0,515	175,0
V	303,5	0,280	85,9
VI	330,5	0,532	163,0

T a b e l l e 3 : Auf  $N_{\max}$  bezogene Traglasten bzw. Traglastspannung

### 3.4 Versuchsnachrechnungen

Die Auswertung der Versuche an mittig belasteten Stahlbetonwänden in [15] hat gezeigt, daß bei Berechnungen von Wänden durchaus größere Abweichungen in Kauf genommen werden müssen, als bei den in statischer Hinsicht wesentlich einfacheren Stützen. Neben einer u.U. größeren Streuung der Baustoffwerte muß mit einem Abweichen in der Lage der Bewehrung in beiden Ebenen und Richtungen gerechnet werden. Die Einleitung der ausmittigen Linienlast kann weitere Genauigkeitsprobleme mit sich bringen.

Die nachfolgenden Berechnungen zu den Versuchswänden wurden mit mittleren Baustoffkennwerten durchgeführt, die am Versuchstag ermittelt wurden. Als Rechenfestigkeit  $\beta_R$  wurde die Prismenfestigkeit angesetzt. Alle Querschnittswerte entsprechen den

bei der Ausführung kontrollierten Maßen der Versuchswände.

Zunächst wurde untersucht, welchen Einfluß die konstruktiven Maßnahmen zur Lasteinleitung und zur vierseitigen Lagerung auf die rechnerische Traglastermittlung haben und wie sie gegebenenfalls zu berücksichtigen sind.

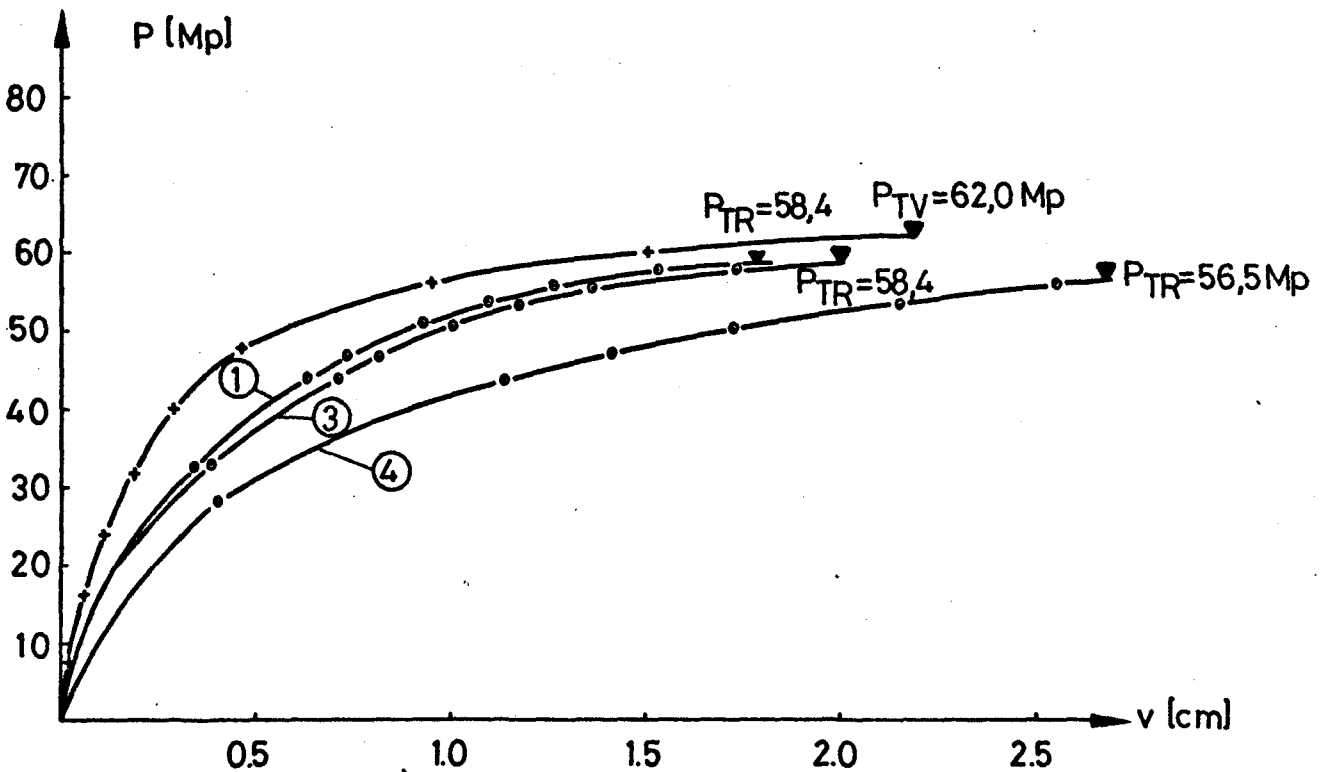
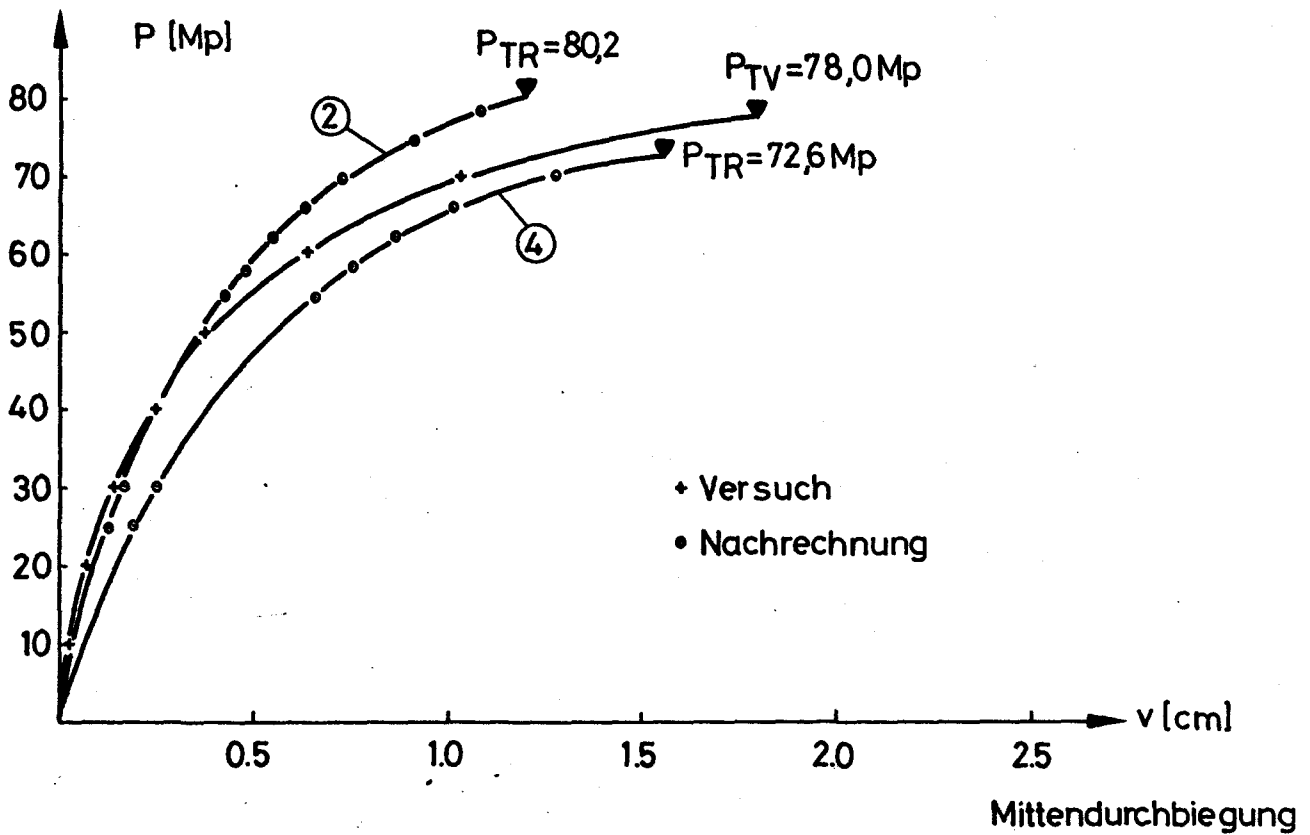
Die zur ausmittigen Lasteintragung erforderliche Kopfausbildung mit Stahlplatte und Halbrund erhöht die Steifigkeiten in Längs- und - trotz Unterteilung durch Fugen - auch in Querrichtung. Berechnungen mit entsprechend eingeführten Steifigkeiten zeigten, daß die Systeme anfangs etwas steifer sind und geringere Verformungen zeigen, die Traglasten jedoch nur unwesentlich höher liegen. Die geringfügige Nachgiebigkeit der Seitenränder hat bei Wahl eines entsprechenden statischen Systems größere Verformungen zur Folge. Später eintretende Momentenlagerungen führen aber dazu, daß die Traglasten kaum geringer sind als bei Systemen mit starrer Stützung. Diese Voruntersuchungen haben es ermöglicht, bei den weiteren Berechnungen auf eine Berücksichtigung beider Einflüsse zu verzichten.

Versuchsnachrechnungen mit einem drillweichen Trägerrost haben gezeigt, daß zwischen den versuchsmäßig und den rechnerisch ermittelten Last-Verformungsbeziehungen erhebliche Abweichungen bestehen. Gegenüber der Rechnung ergaben sich im Versuch wesentlich höhere Traglasten bei kleineren Verformungen. Unbefriedigend bezüglich des Verformungsverhaltens waren auch die Nachrechnungen mit konstant gehaltenen minimalen bzw. mittleren Torsionssteifigkeiten, obwohl eine spürbare Traglaststeigerung gegenüber dem drillweichen Ansatz zu verzeichnen war.

Wie schon unter Abschn. 2.6 beschrieben, wurde die Torsionssteifigkeit der einzelnen Stäbe im Zustand II vereinfachend von der Biegebeanspruchung abhängig gemacht. Die Versuche wurden mit verschiedenen - innerhalb der vorgegebenen Bandbreite liegenden - Annahmen über den Abfall der Torsionssteifigkeit nachgerechnet.

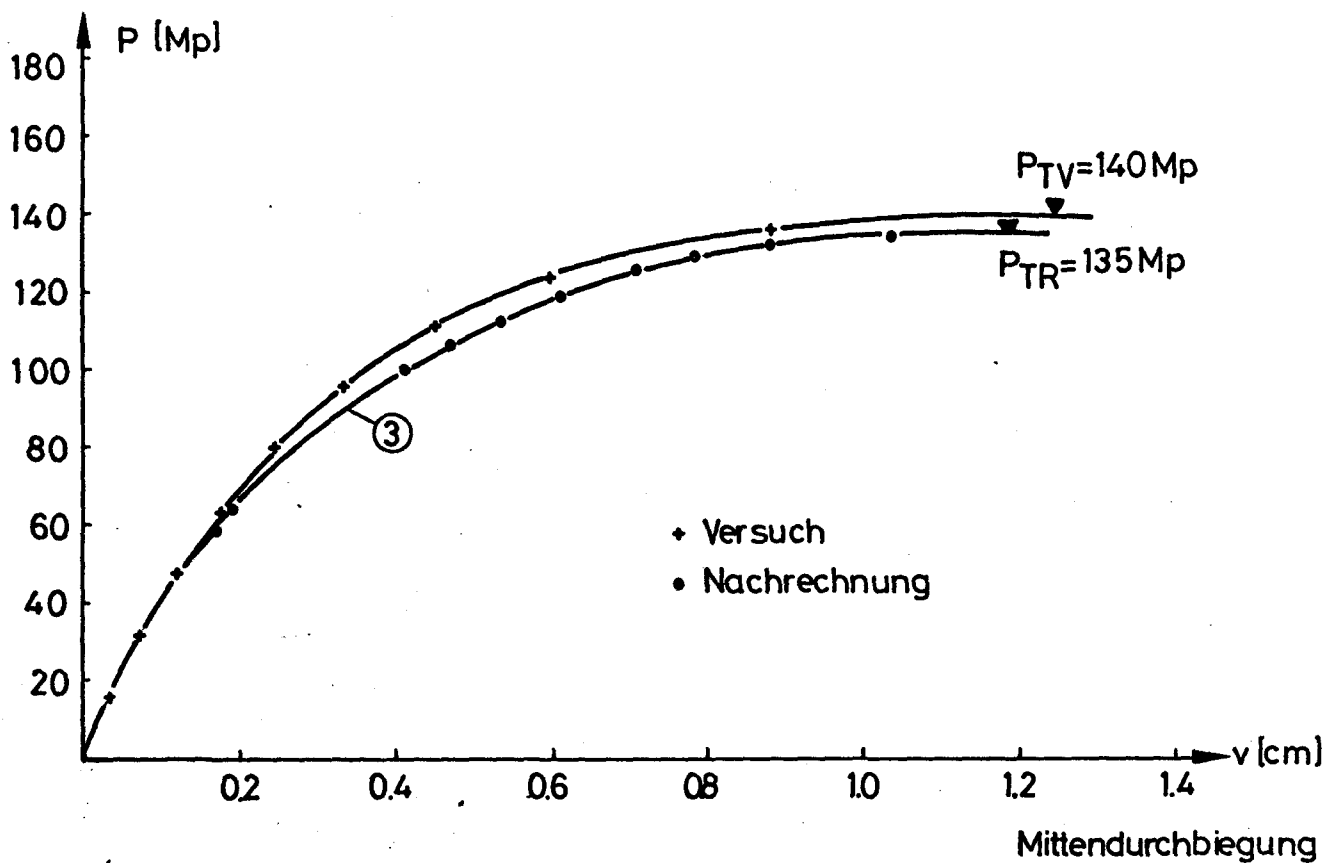
Bild 11 zeigt die lastabhängigen Durchbiegungen der Versuchswände 2 und 3 in Wandmitte. Die Torsionssteifigkeiten der Ver-



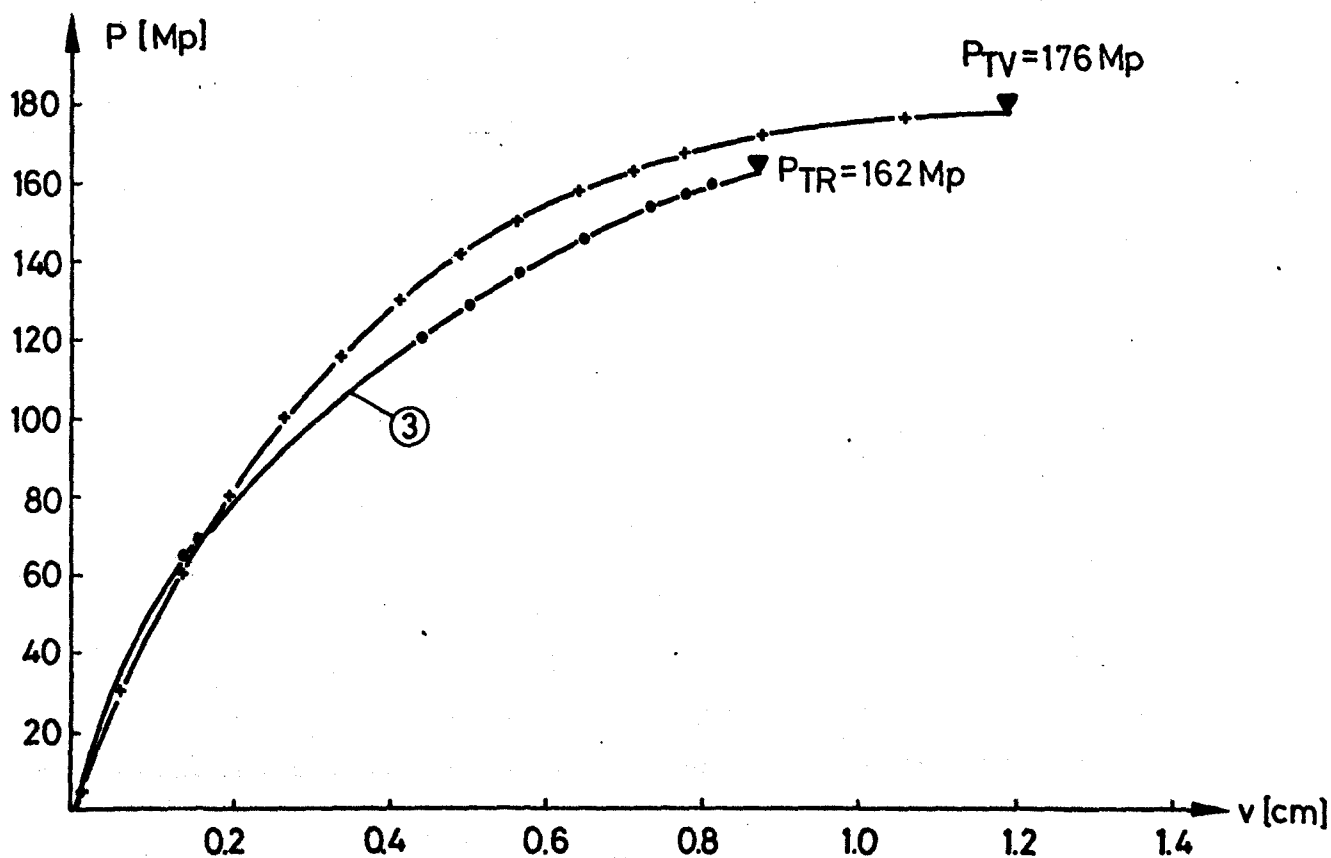


## Nachrechnungen Versuchswand 3

# Nachrechnung Versuchswand 4



# Nachrechnung Versuchswand 6



suchswand 2 wurden nach den Annahmen (2) und (4) des Bildes 9 ermittelt. Das Verformungsverhalten wird im allgemeinen recht gut erfaßt. Die Abweichungen bei der Maximalverformung im Traglastzustand betragen -29% bzw. -14%, die Unterschiede in den Traglasten -3% bzw. -7%.

Die Last-Verformungsbeziehungen der Versuchswand 3 wurden mit den Funktionen (1), (3) und (4) des Bildes 9 nachgerechnet (s. untere Hälfte des Bildes 11). Bei der hier vorliegenden relativ großen Ausmitte ist die Übereinstimmung bei den Verformungen nicht ganz so befriedigend. Der Unterschied in den Traglasten beträgt bei (1) und (3) -7%, bei (4) -11%.

Weitere Nachrechnungen mit der Funktion (3) für die Wände 4 und 6 zeigt Bild 12. Bei Wand 4 betragen die Abweichungen -5% bei der Verformung und -4% bei der Traglast, bei Wand 6 entsprechend -27% und -8%.

### 3.5 Vergleich der rechnerischen Traglasten mit anderen Methoden und mit den Versuchsergebnissen

Die in Bild 9 im Vergleich zur drillweichen Rechnung wiedergegebenen - von Schlankheit und Ausmitte abhängigen - Traglasten einer drillsteifen Stahlbetonwand sind in Bild 13 den Ergebnissen eigener Versuche bzw. anderer Berechnungsverfahren gegenübergestellt.

Die von Wiegand/Uhlisch ermittelten Traglasten [5] sind mit gestrichelten Linien dargestellt. Wie schon unter 1.4 erläutert, werden in [5] die Drillsteifigkeiten nach der Beziehung

$$\text{Drill} = \alpha \sqrt{EI_L \cdot EI_Q}$$

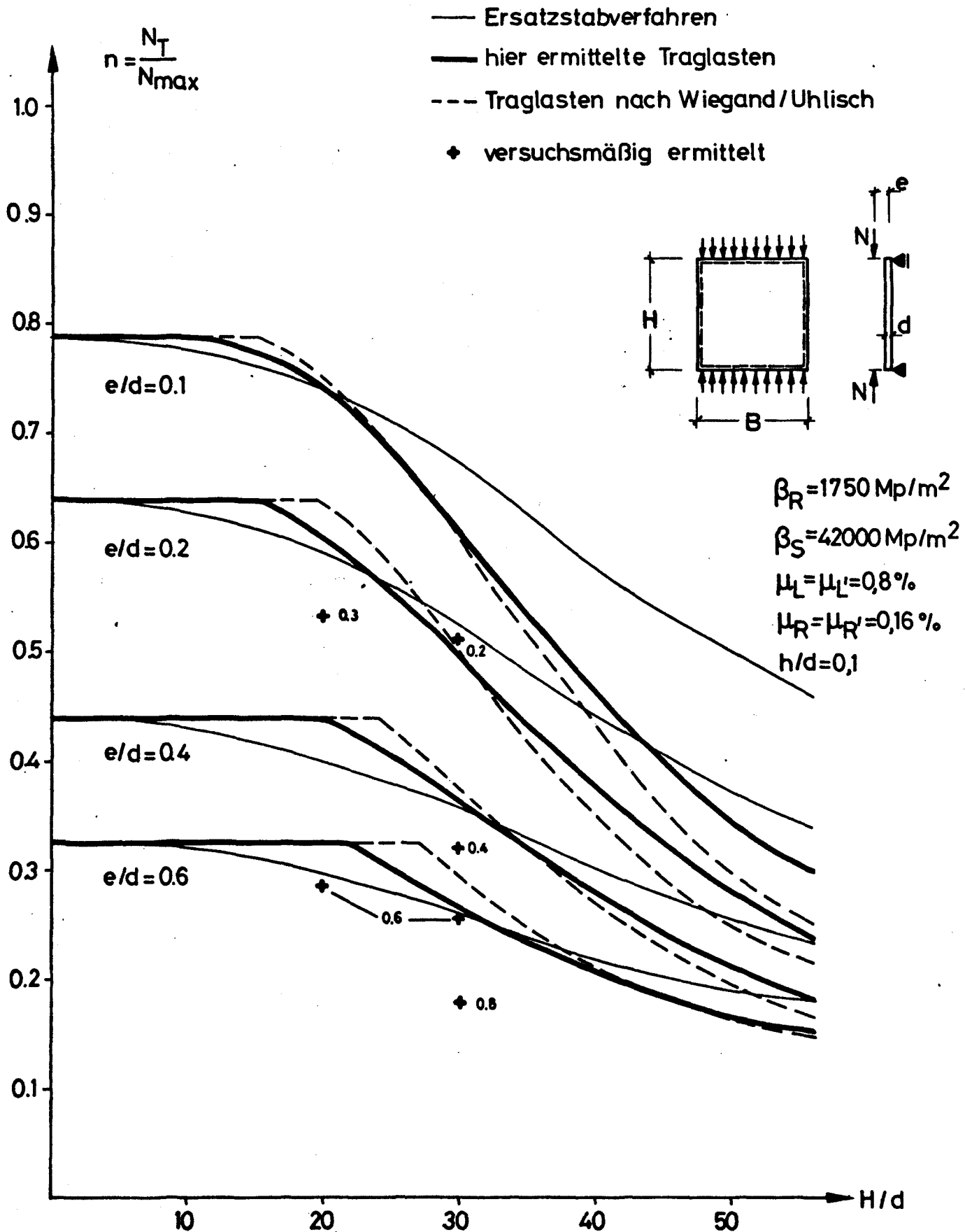
ermittelt. Die Berechnung der zugehörigen Biegesteifigkeiten  $EI_L$  und  $EI_Q$  im Zustand II erfolgt mit mittleren Ersatzbiegesteifigkeiten. Die etwas zu weit auf der sicheren Seite liegenden Traglasten bei den großen Schlankheiten sind vermutlich auf

den zu niedrig gewählten Beiwert  $\mu = 0,6$  zurückzuführen.

Die Traglasten, die sich nach den bisher üblichen Berechnungsmethoden mit Hilfe des Ersatzstabverfahrens ergeben, sind mit dünnen Linien in Bild 13 eingezeichnet. Ein genauer Vergleich kann nicht gezogen werden, da beim Ersatzstabverfahren die Wand bei der Ermittlung der Knicklänge als homogener, isotroper Körper angesehen wird und somit eine unterschiedliche Bewehrung in Längs- und Querrichtung nicht berücksichtigt werden kann. Für den Vergleich wurden mittlere Bewehrungsgehalte in Längs- und Querrichtung von  $\mu = \mu' = 0,6\%$  angenommen.

Es ist festzustellen, daß die auch dem Ersatzstabverfahren ermittelten Traglasten bei kleinen Schlankheiten gegenüber den nach den genaueren Verfahren ermittelten Werten etwa entsprechen, jedoch bei mittleren und großen Schlankheiten Abweichungen von 15% bis 70% auf der unsicheren Seite ergeben. Wegen der großen praktischen Bedeutung dieser Feststellungen wird in Abschnitt 5 hierauf noch näher eingegangen.

Die versuchsmäßig ermittelten Werte sind bei den Schlankheiten  $H/d = 20$  und  $H/d = 30$  durch Kreuze gekennzeichnet. Vier der sechs Versuchswerte stimmen - mit geringen Abweichungen nach beiden Seiten - gut mit den Ergebnissen nach den genaueren Verfahren überein. Bei den Wänden 2 und 5 bringen die Versuche ~12% niedrigere Traglasten als die zum Vergleich herangezogenen Berechnungsverfahren. Die Abweichungen bei Wand 5 sind u.a. vermutlich auf die vergleichsweise niedrigen Betonfestigkeiten zurückzuführen, während bei Wand 2 eine ungleichmäßige Lasteintragung und zu grobe Laststufen zu einer niedrigeren Traglast führten. Die hier rechnerisch ermittelten Traglasten liegen - bis auf eine Ausnahme - gegenüber denen nach [5] näher zu den Versuchswerten.



Bezogene Traglasten einer allseits gelenkig gelagerten Stahlbetonwand nach verschiedenen Berechnungsverfahren im Vergleich zu versuchsmäßig ermittelten Werten

#### 4. Allgemeines Trag- und Verformungsverhalten und Parameterstudien

##### 4.1 Allgemeines Trag- und Verformungsverhalten der Wände

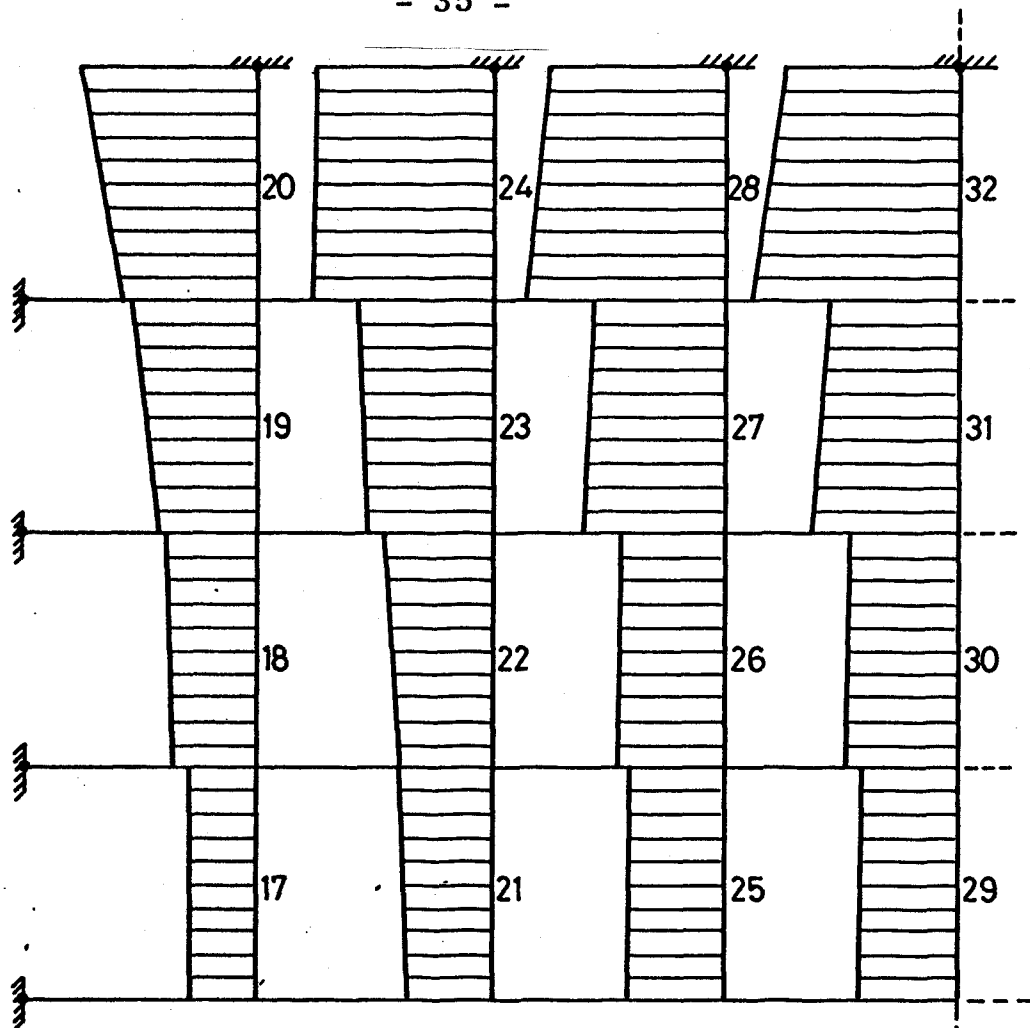
Die hier untersuchten Wände mit dem Seitenverhältnis  $H/B = 1.0$  umfassen den Schlankheitsbereich  $H/d = 10$  bis  $H/d = 50$  sowie den Ausmittenbereich  $e/d = 0.1$  bis  $e/d = 0.6$ . Der Bewehrungsgrad beträgt  $\mu_L = \mu_L' = 0,8 \%$  und  $\mu_a = \mu_a' = 0,16 \%$ . Solche Wände versagen in der Regel durch Materialbruch in der überdrückten Längsrichtung im Bereich des oberen Wandviertels in  $B/2$ . Bei den kleinen Ausmitten im Schlankheitsbereich  $H/d = 50$  tritt ein Versagen infolge Stabilitätsverlustes auf. In Querrichtung, d.h. in der lastfreien Richtung, tritt vor dem Erreichen der Traglast ein Fließen auf; bei kleinen und mittleren Schlankheiten (Versagen durch Materialbruch) und großen Ausmitten sogar bei 50 bis 60 % der Traglast.

Zur Verdeutlichung des Trag- und Verformungsverhaltens werden in den Bildern 14 und 15 die Biege- und Torsionsmomentenverläufe der nachgerechneten Versuchswand 3 ( $H/d = 30$ ,  $e/d = 0.6$ ) für einen Lastzustand in Traglastnähe maßstäblich wiedergegeben. Wegen der geringen Biegesteifigkeit in Querrichtung (niedriger Bewehrungsprozentsatz im Vergleich zu den Längsstäben, keine Überdrückung infolge Normalkraft) sind die Quermomente wesentlich geringer als die Längsmomente. Das Verhältnis der Bruchmomente in Längs- und Querrichtung beträgt hier

$$M_{uL}/M_{uQ} = 8.06/1.28 = 6.3$$

Die Biegebeanspruchung in Längsrichtung ist im oberen Viertel der Wand am größten. Während der Laststeigerung finden Umlagerungen statt. Die maximal beanspruchte Stelle wandert infolge des Ein-

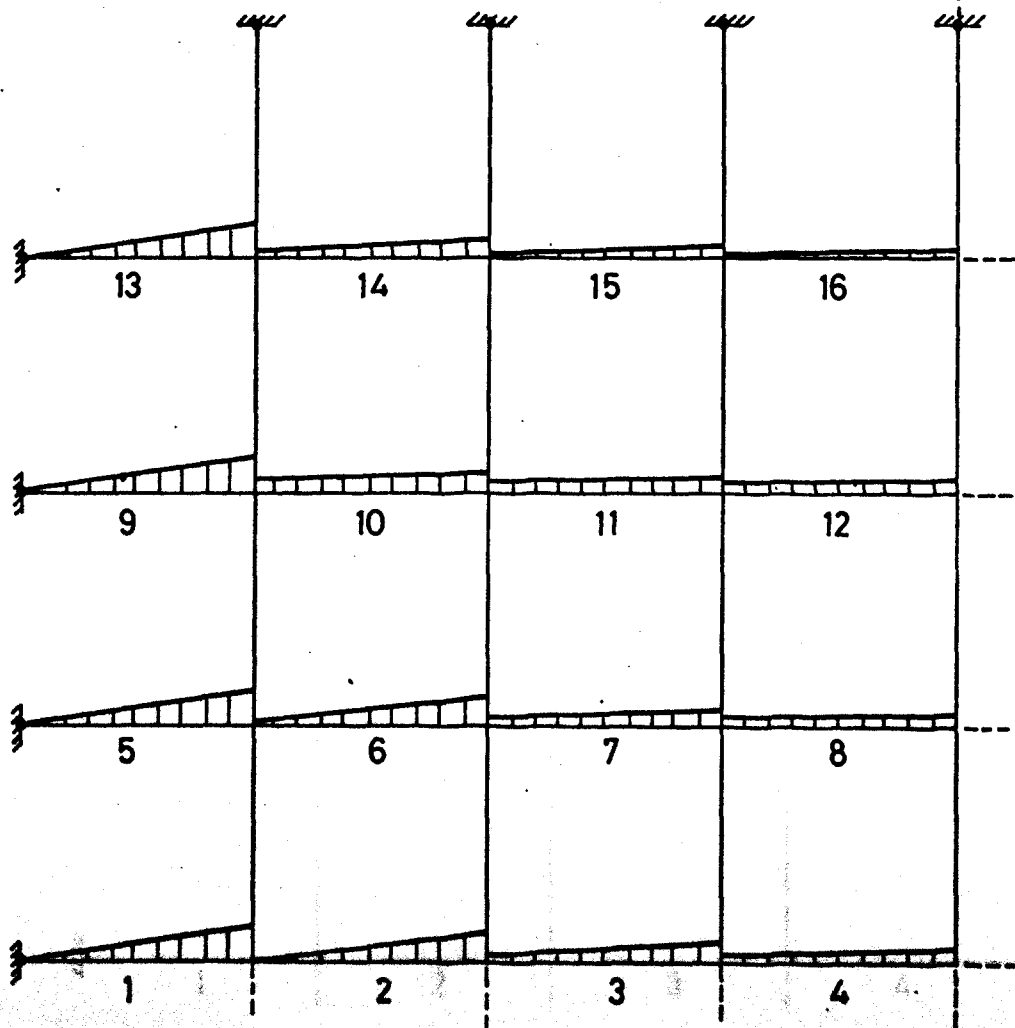
Längsstäbe



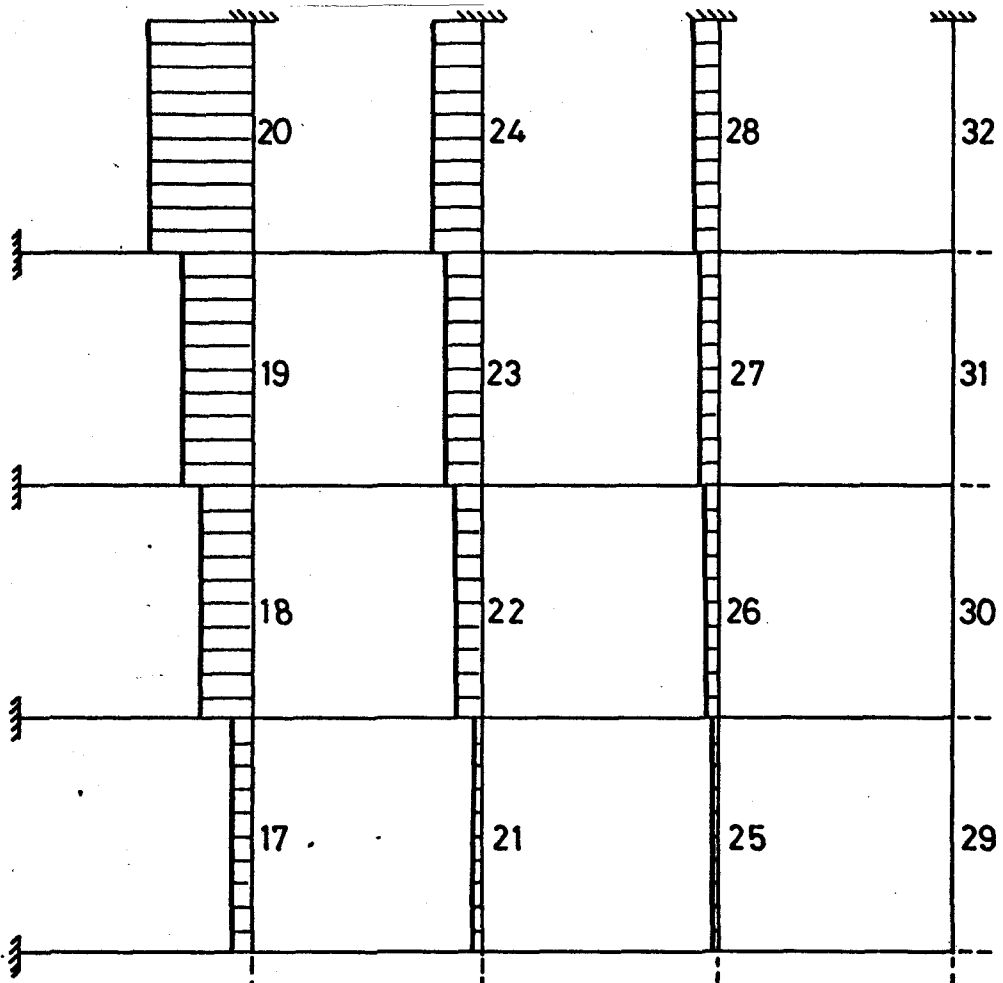
Biegemomentenverlauf in Traglastnähe  
Versuchswand 3 (oberes Wandviertel)

1cm  $\hat{=}$  3 Mpm

Querstäbe



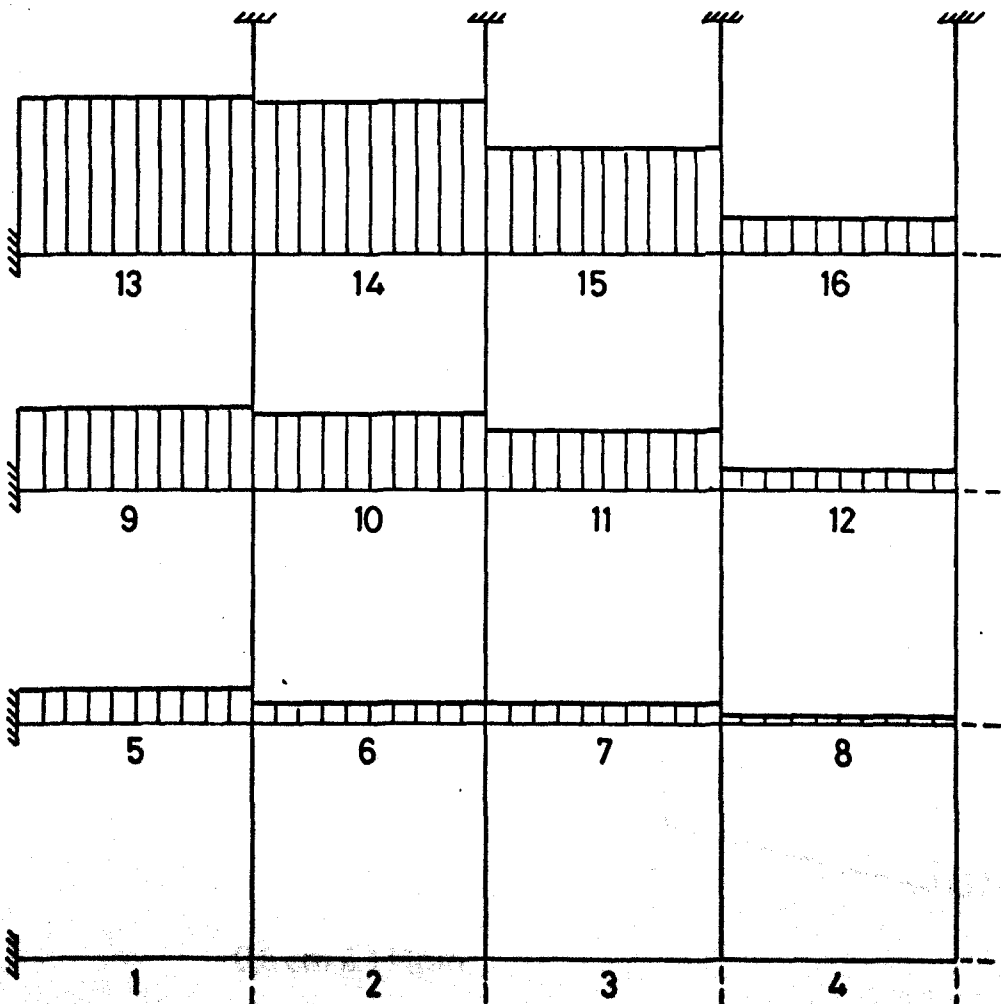
Längsstäbe



Torsionsmomentenverlauf in Traglastnähe  
Versuchswand 3 (oberes Wandviertel)

1cm  $\hat{=}$  3Mpm

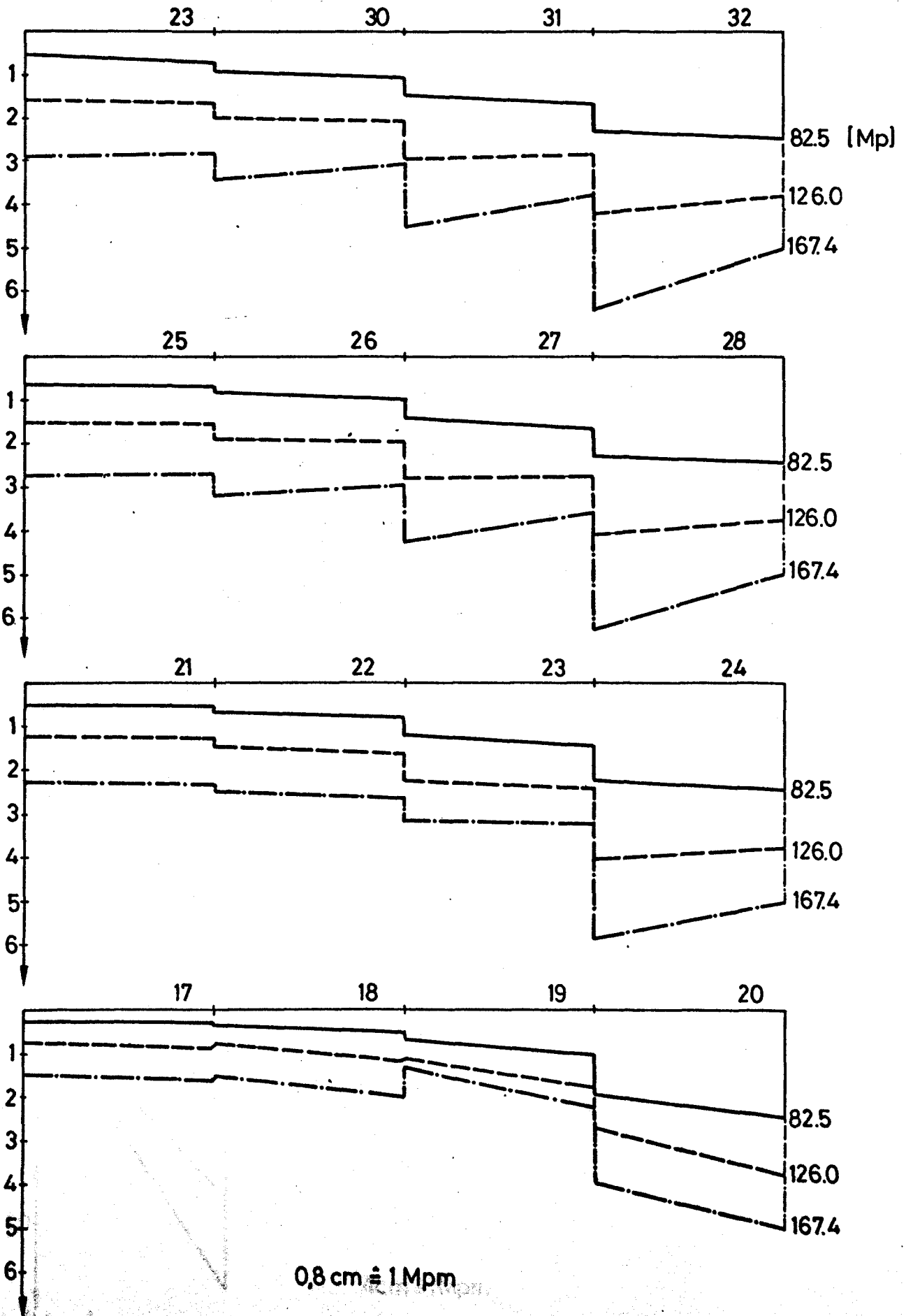
Querstäbe



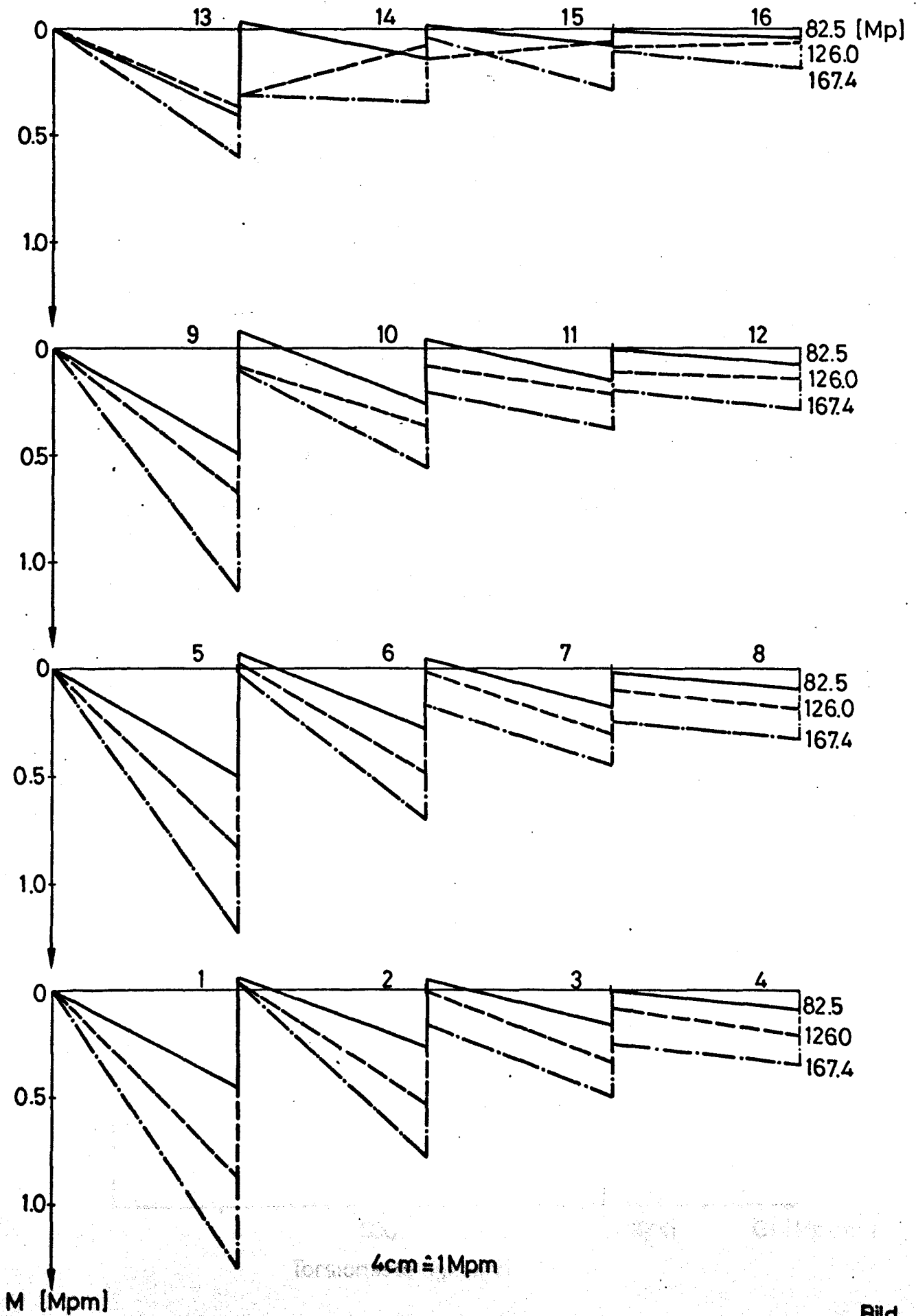


# Längsmomente von Versuchswand 4

bei verschiedenen Laststufen



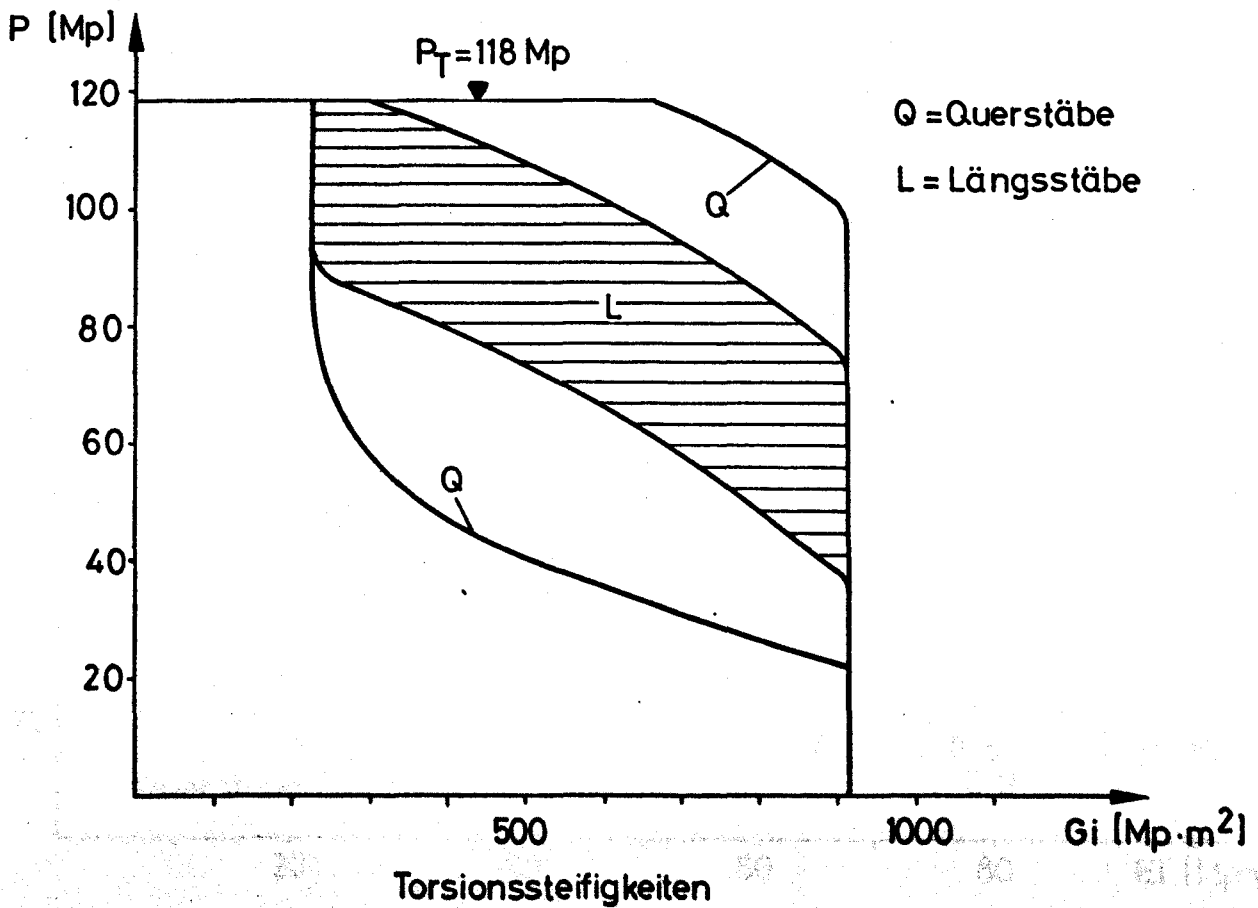
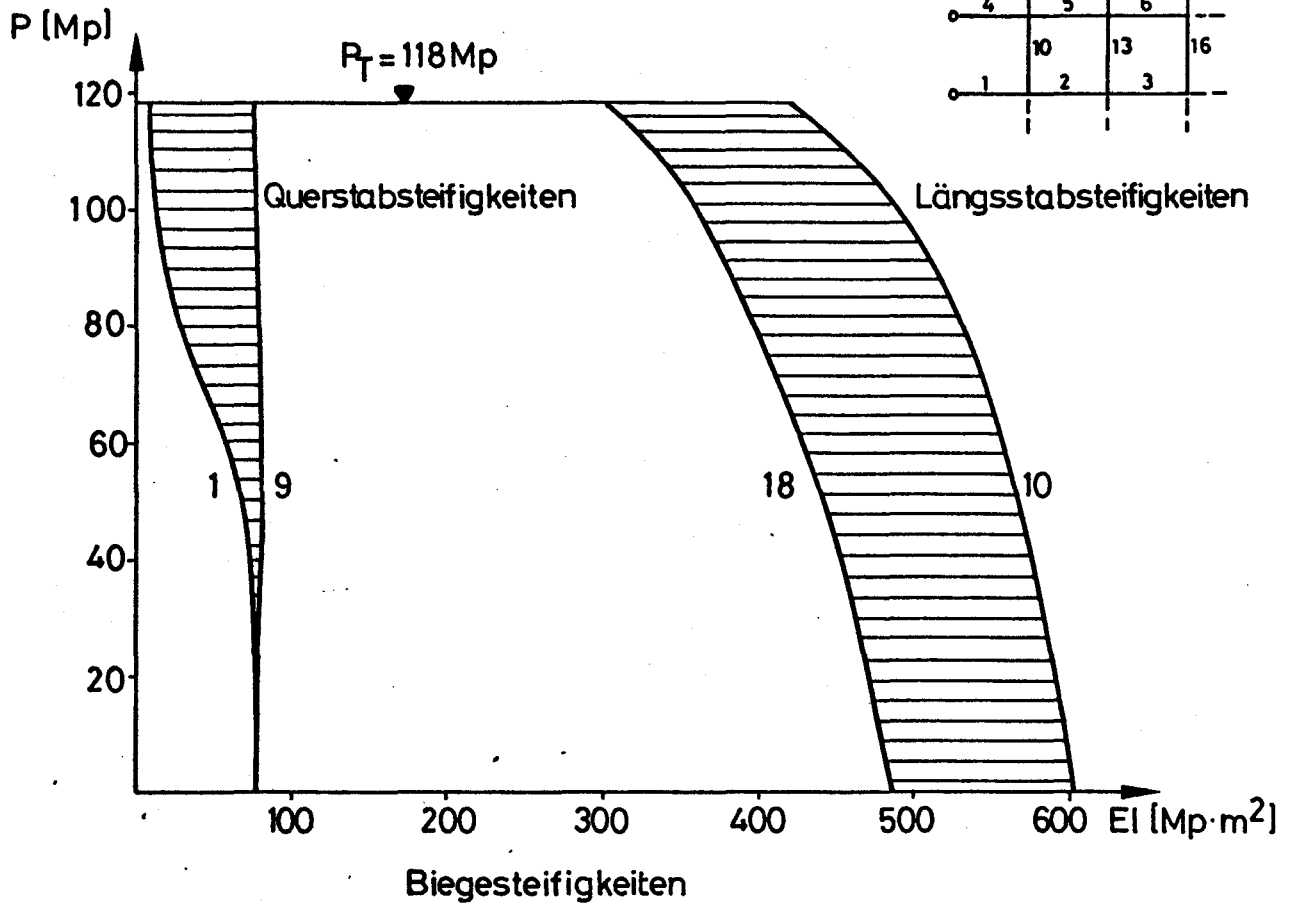
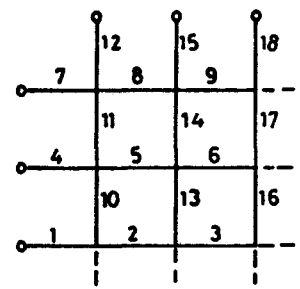
# Quermomente von Versuchswand 4 bei verschiedenen Laststufen



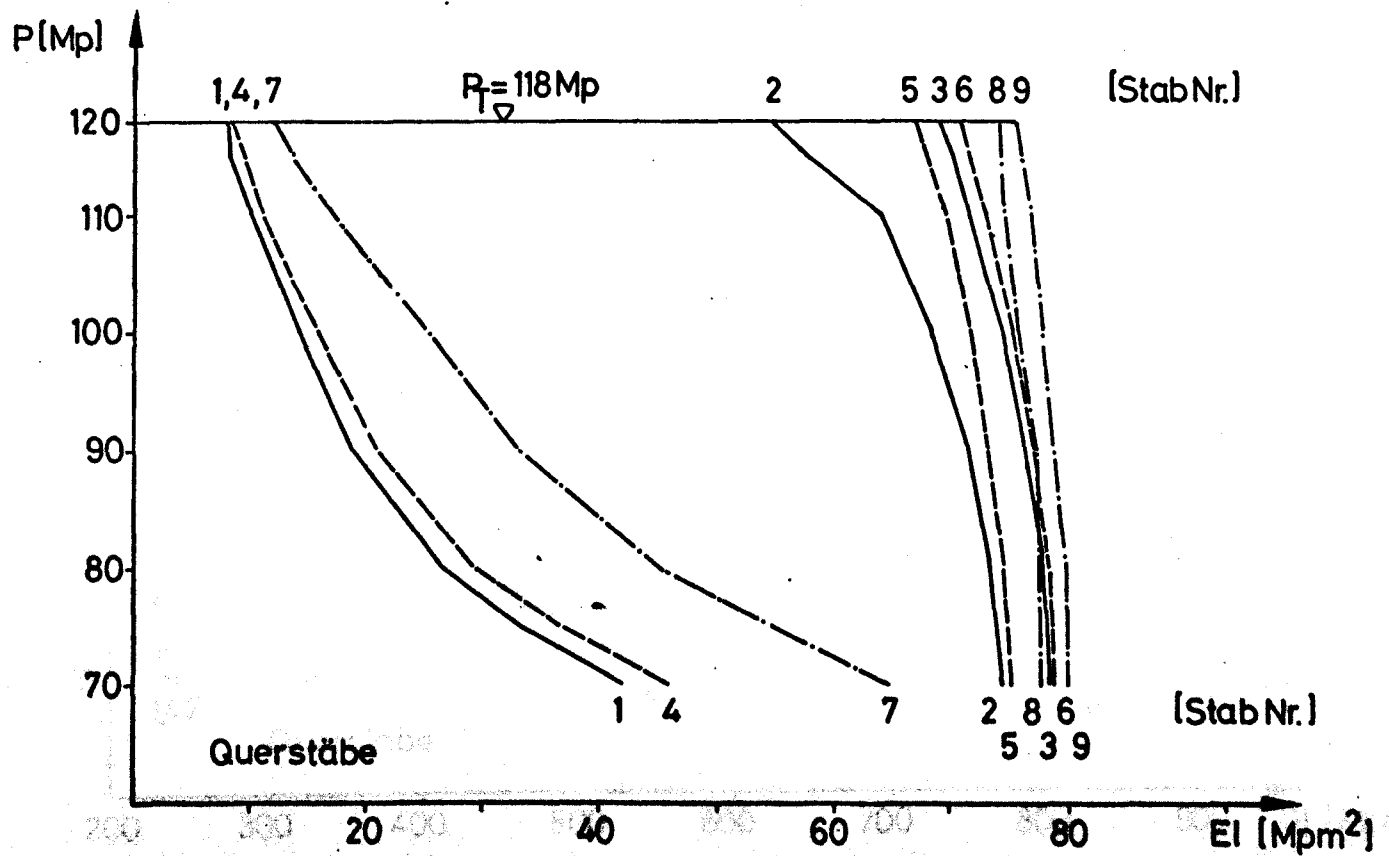
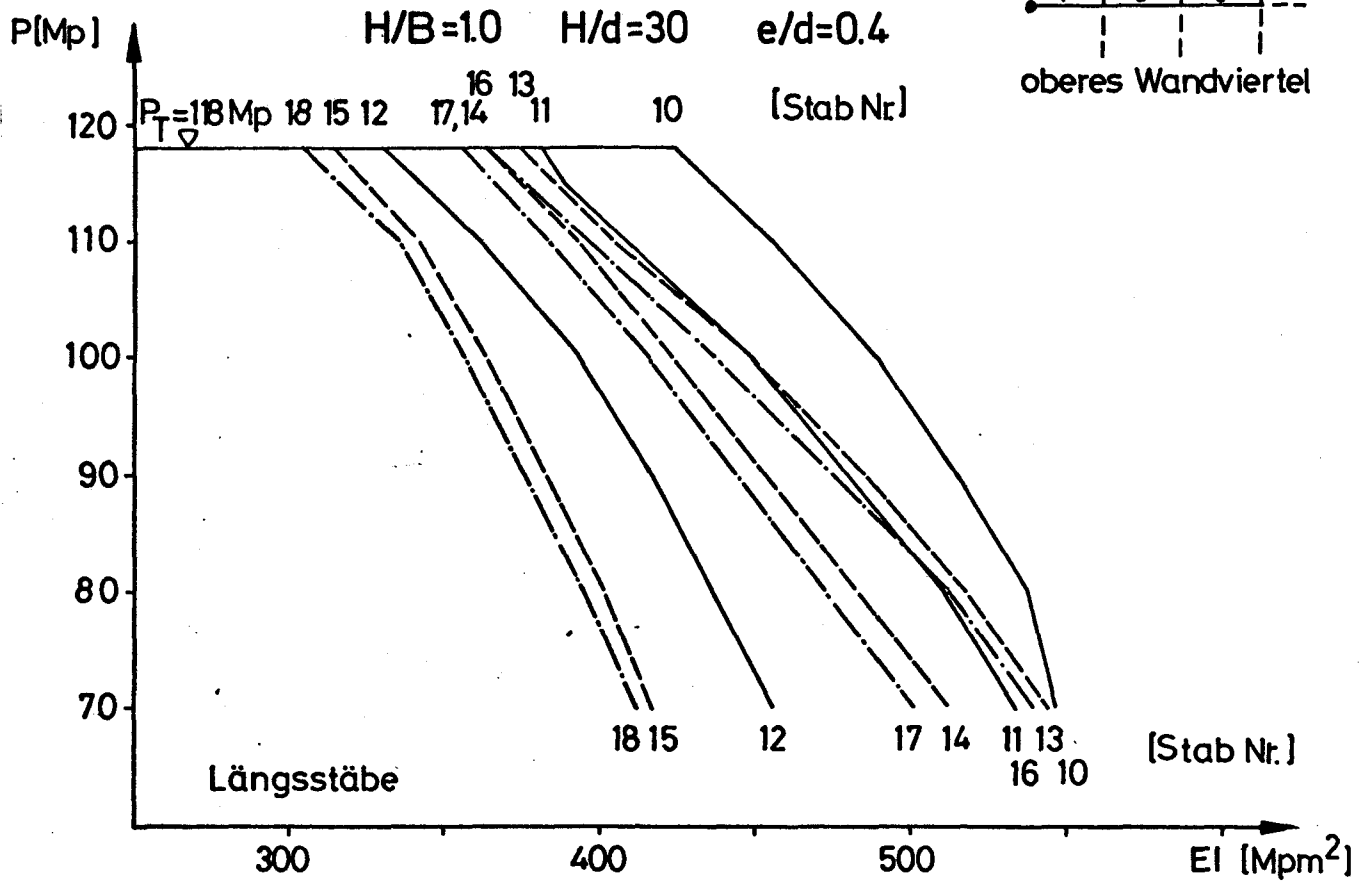
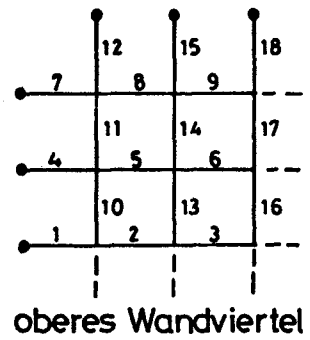
$H/B=1.0$

$H/d=30$

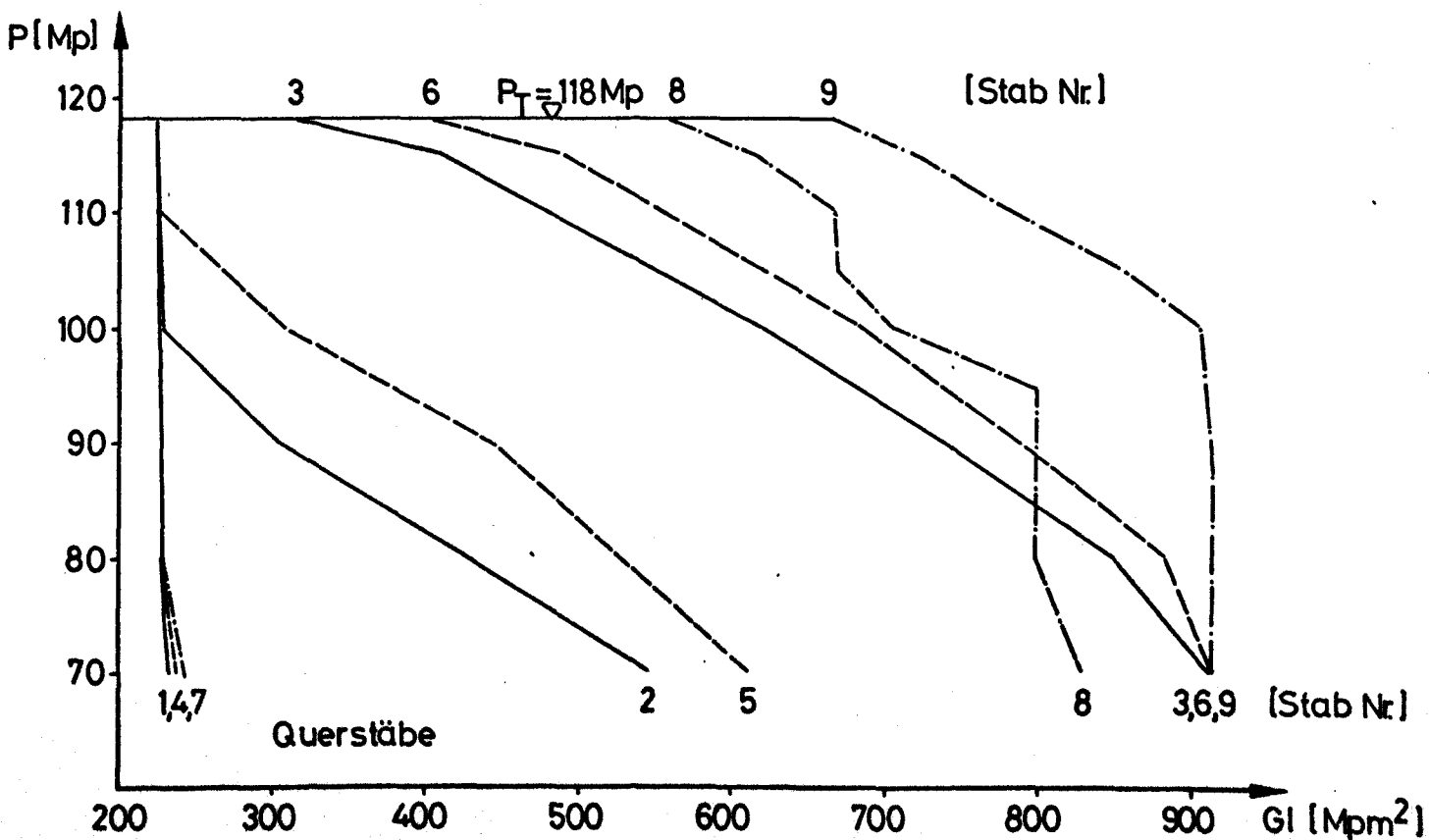
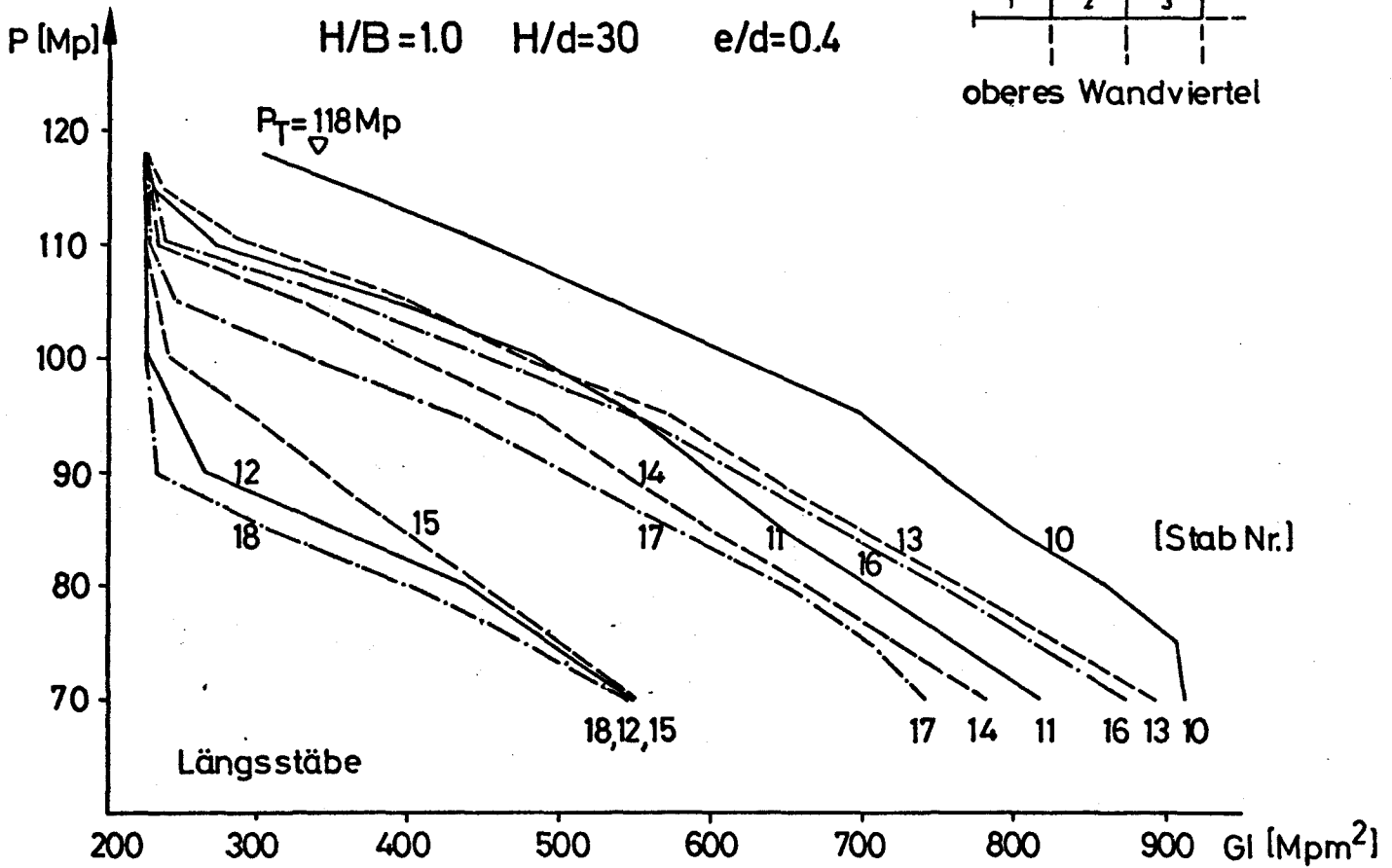
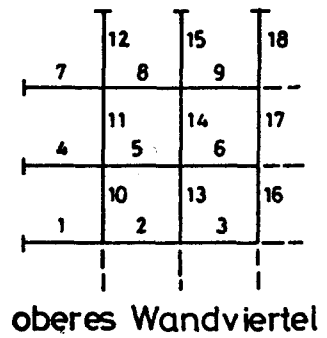
$e/d=0.4$



# Wirksame Biegesteifigkeiten in Abhängigkeit von der Last (Bereich oberhalb der Gebrauchslast)



# Wirksame Torsionssteifigkeiten in Abhängigkeit von der Last (Bereich oberhalb der Gebrauchslast)



flusses der Theorie II. Ordnung und des nichtlinearen Wirkstoffverhaltens vom belasteten Rand in das Innere der Wandscheibe (Bild 16).

Die Konzentration der Drillmomente in den Eckbereichen der Wand (Bild 15) beeinflusst wesentlich den Quermomentenverlauf. Die Biegebeanspruchung in Querrichtung ist in der Nähe der lotrechten Seitenränder am größten (Bild 17).

Bei einer rechnerischen Traglastermittlung mit allmählicher Laststeigerung sind sowohl bei den Quer- als auch bei den Längsstäben erhebliche Verluste bei den Steifigkeiten festzustellen. Bei den Biegesteifigkeiten schwanken die Werte in Querrichtung zwischen 20 % und 50 %. Bild 18 gibt einen Überblick über den Abfall der Biege- und Torsionssteifigkeiten für eine Wand mit den Verhältnissen

$$H/B = 1.0 \quad H/d = 30 \quad e/d = 0.4$$

im gesamten Lastbereich bis zur Traglast. Die Steifigkeitsverläufe sind kennzeichnend für Wände, die durch Materialbruch in der Wand ihre Traglast erreichen.

Betrachtet man die Einzelstäbe, so sind je nach vorliegender Ausmitte mehr oder weniger große Unterschiede bei den Teilstabsteifigkeiten festzustellen. Bild 19 zeigt den Biegesteifigkeitsabfall

zwischen Gebrauchs- und Traglast bei der o.g. Wand. Auffallend sind die großen Steifigkeitsverluste (bis zu 90 %) bei den Randquerstäben. Im Falle des Versagens durch Stabilitätsverlust verhalten sich die Biegesteifigkeiten der Einzelstäbe bis zu einem Lastwert kurz unterhalb der Traglast wie ein Stab. Dann erst beginnt ein unterschiedliches Absinken der Einzelsteifigkeiten.

Infolge einer nahezu gleichmäßigen Biegebeanspruchung in Längsrichtung sinken bei der hier gezeigten Wand definitionsgemäß alle Torsionssteifigkeiten in dieser Richtung auf den vorgegebenen Mindestwert von 25 % ihrer Ausgangssteifigkeit, während die Torsionssteifigkeiten der Querstäbe unterschiedlich stark abfallen.

Der Steifigkeitsabfall schwankt - je nach Vorliegen von Stabilitäts- oder Materialversagen - bei den Querstäben zwischen 30 % und 60 %, bei den Längsstäben zwischen 5 % und 75 %.

Einen Überblick über die Verformungen von Wänden mit dem Verhältnis  $H/B = 1,0$  gibt Tabelle 4. Sie zeigt bei Variation von Schlankheit und Ausmitte die Größe der zur Gebrauchs- und

H/d	e/d	$f_G$ [cm]	$H/f_G$	$f_T$ [cm]	$H/f_T$
20	0,10	0,23	1288	1,01	297
30	0,10	0,43	1047	2,46	183
30	0,20	0,77	584	3,55	127
30	0,40	1,32	341	4,85	93
30	0,60	1,61	280	5,30	85
50	0,10	0,72	1042	3,34	225
50	0,40	1,70	441	13,50	56
50	0,60	2,40	312	14,10	53

**Tabelle 4:** Mittendurchbiegungen im Gebrauchs- und Traglastzustand [d = 15 cm]

Traglast gehörenden Mittendurchbiegungen als absolute sowie auf die Wandhöhe bezogene Werte ( $d = 15 \text{ cm}$ ). Im Mittel beträgt das Verhältnis der Mitteldurchbiegungen im Traglast- und Gebrauchszustand

$$f_T/f_G \sim 5,0$$

Beim Vorliegen von Stabilitätsversagen kann dieser Wert auf 8,0 ansteigen.



## 4.2 Parameterstudien

### 4.2.1 Auswahl der Parameter

Die Anzahl der Parameter, die einen beachtenswerten Einfluß auf das Trag- und Verformungsverhalten ausmittig belasteter Stahlbetonwände haben, ist groß. Um wesentliche Einflüsse studieren zu können, wurden folgende Parameter variiert:

- a) die bezogene Schlankheit  $H/d$
- b) die bezogene Ausmitte  $e/d$
- c) das Verhältnis Quer- zu Längsbewehrung
- d) das Verhältnis Wandhöhe zu -breite

Die Rechnungen wurden größtenteils mit den Werten  $\beta_R = 1750 \text{ Mp/m}^2$  für den Beton und  $\beta_S = 42000 \text{ Mp/m}^2$  für den Stahl durchgeführt. Als mittleres Verhältnis Randabstand der Bewehrung zu Wanddicke wurde für die lotrechte und waagerechte Bewehrung vereinfachend  $h'/d = 0,1$  angesetzt.

### 4.2.2 Einfluß der Schlankheit und Ausmitte auf die Traglasten

Bei den zunächst zu untersuchenden Punkten a) und b) wurden die bezogenen Schlankheiten  $H/d = 10, 30$  und  $50$  bei Variation der bezogenen Ausmitte ( $e/d = 0,1; 0,2; 0,4$  und  $0,6$ ) die Traglasten für allseitig gelenkig gelagerte Wände unter folgenden zusätzlichen Annahmen ermittelt:

$$H/B = 1,0 \quad \mu_L = \mu_L' = 0,8 \quad \mu_Q = \mu_Q' = 0,16$$

Das Verhältnis Quer- zu Längsbewehrung beträgt  $1/5$  und entspricht somit der bisher bei Wänden üblichen Bewehrungsführung. Die auf

$$N_{\max} = (\beta_R + 2 \cdot \mu_L \cdot \beta_S) \cdot b \cdot d$$

bezogenen Traglasten werden in Bild 9 wiedergegeben; Scharparameter ist die bezogene Ausmitte  $e/d$ . Bei den kleineren Ausmitten

macht sich der Traglastabfall infolge zunehmender Schlankheit deutlicher bemerkbar als bei den größeren Ausmitten.

#### 4.2.3 Der Einfluß des Seitenverhältnisses $H/B$ auf das Trag- und Verformungsverhalten

Diese Untersuchungen werden - wie auch die nachfolgende Studie über den Einfluß des Querbewehrungsprozentsatzes auf die Traglasten - am drillweichen System durchgeführt, da die Tendenz der im folgenden beschriebenen Zusammenhänge weitgehend unabhängig von der Drillsteifigkeit ist.

Es wurden Vergleichsrechnungen für die Seitenverhältnisse ( $\alpha = H/B$ )

$\alpha = 0,5; 0,67; 1,0; 1,2; 1,5; 2,0$  und  $5,0$

durchgeführt. Die Traglasten wurden mit folgenden Daten ermittelt:

$H/d$  bzw.  $B/d = 15$

$e/d = 0,3$

$\beta_R = 2125 \text{ Mp/m}^2$

$\beta_S = 42000 \text{ Mp/m}^2$

$\mu_L = \mu'_L = 1,0 \text{ ‰}$

$\mu_Q = \mu'_Q = 0,5 \text{ ‰}$

$h'_L/d = h'_Q/d = 0,1$

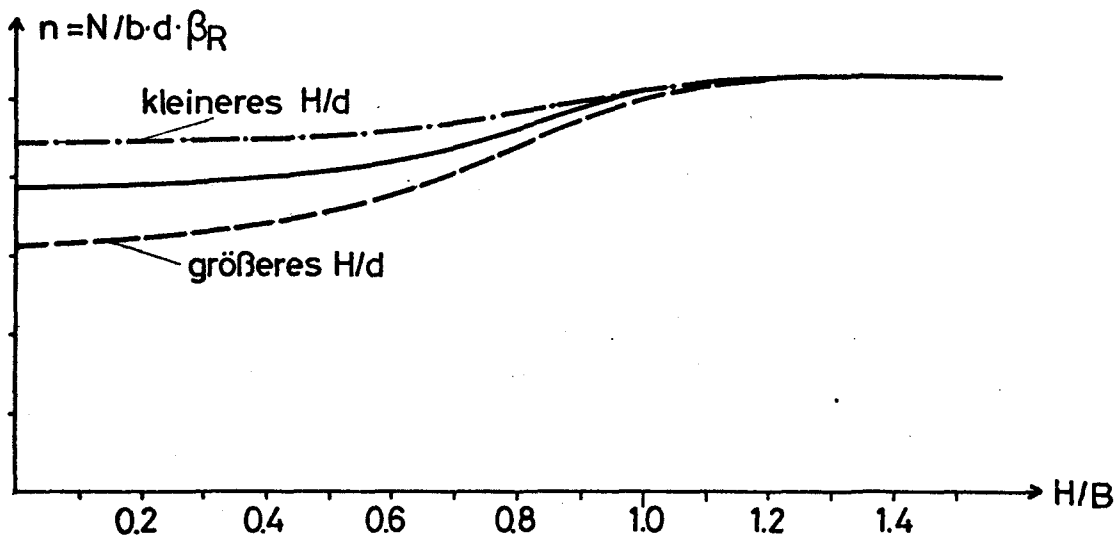
Für allseits gelenkige Lagerung ergeben sich folgende auf

$N_{\max} = (\beta_R + 2\mu_L \cdot \beta_S) \cdot F_b$  bezogene Traglasten:

$\alpha = H/B$	0,5	0,67	1,0	1,2	1,5	2,0	5,0
$n = N_T/N_{\max}$	0,410	0,475	0,508	0,528	0,528	0,528	0,528

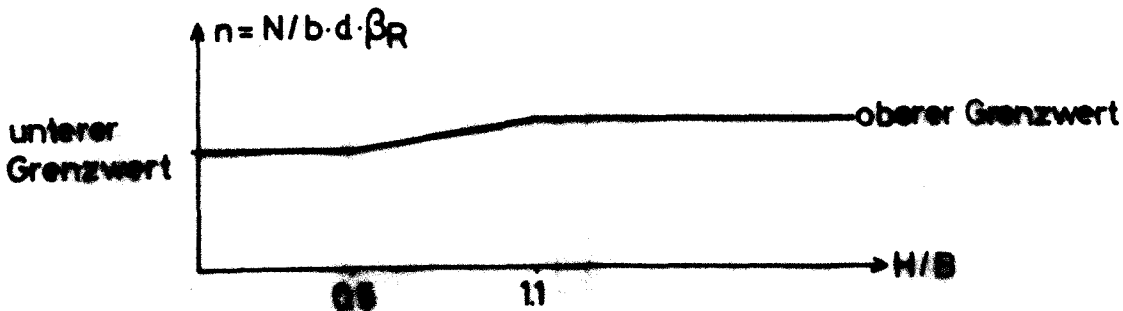
Tabelle 5: Bezogene Traglasten in Abhängigkeit vom Verhältnis  $H/B$

Es zeigt sich (Bild 21), daß vom Verhältnis  $\alpha > 1,0$  das Seitenverhältnis keinen wesentlichen Einfluß mehr auf die Höhe der Traglast hat.



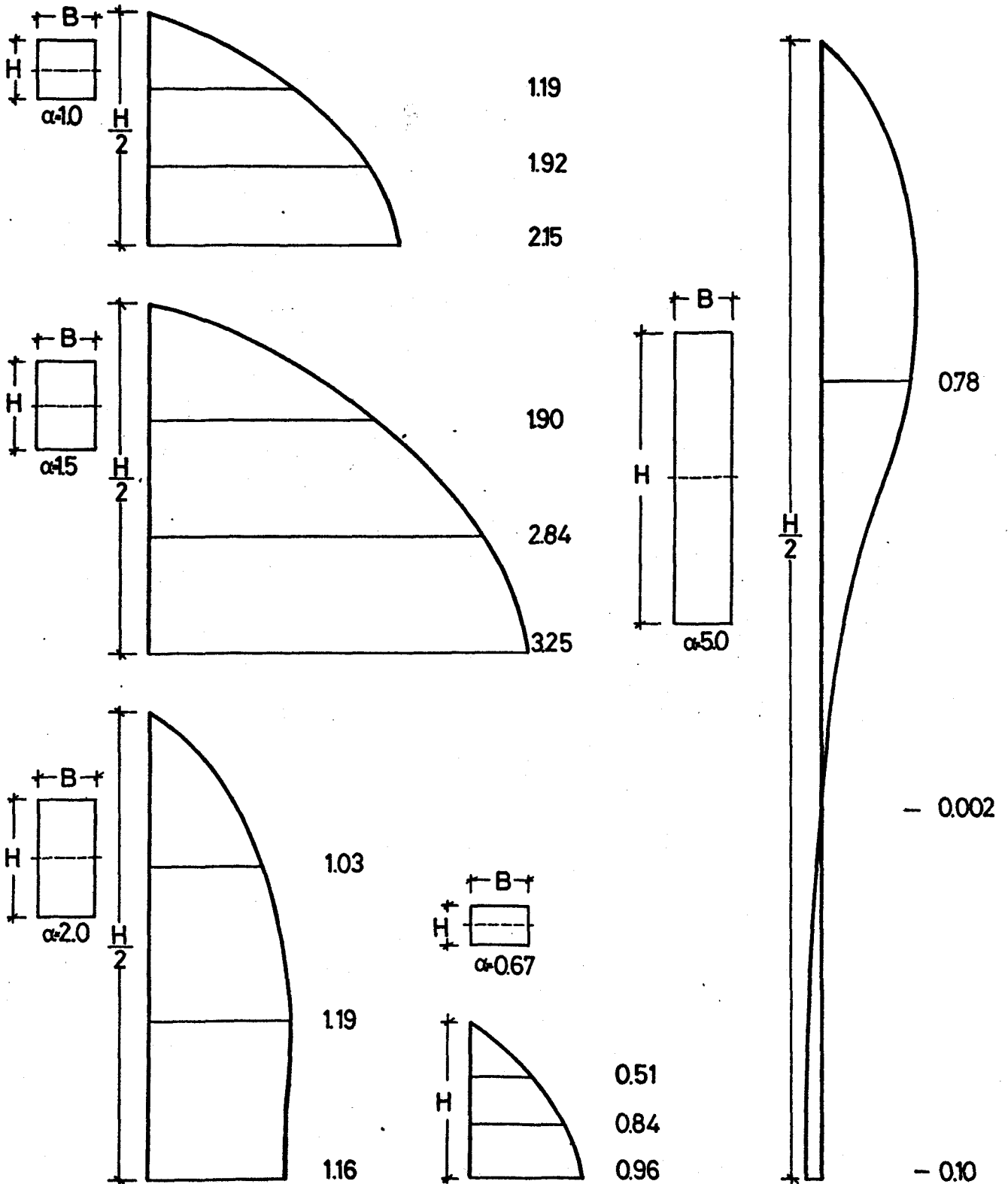
**Bild 21:** Bezogene Traglasten in Abhängigkeit vom Verhältnis  $H/B$

Entsprechend diesem Kurvenverlauf ist es möglich, die Traglast-Kurve zu linearisieren (Bild 22). Andere Schlankheitsverhältnisse wirken sich so aus, daß sich der untere Grenzwert bei  $H/B = 0$  entsprechend dem Traglastunterschied beim Standardstab verschiebt; eine Veränderung der Ausmitte ergibt eine Verschiebung des Gesamtniveaus.



**Bild 22:** Mögliche Linearisierung für die Traglastbeziehung nach Bild 21

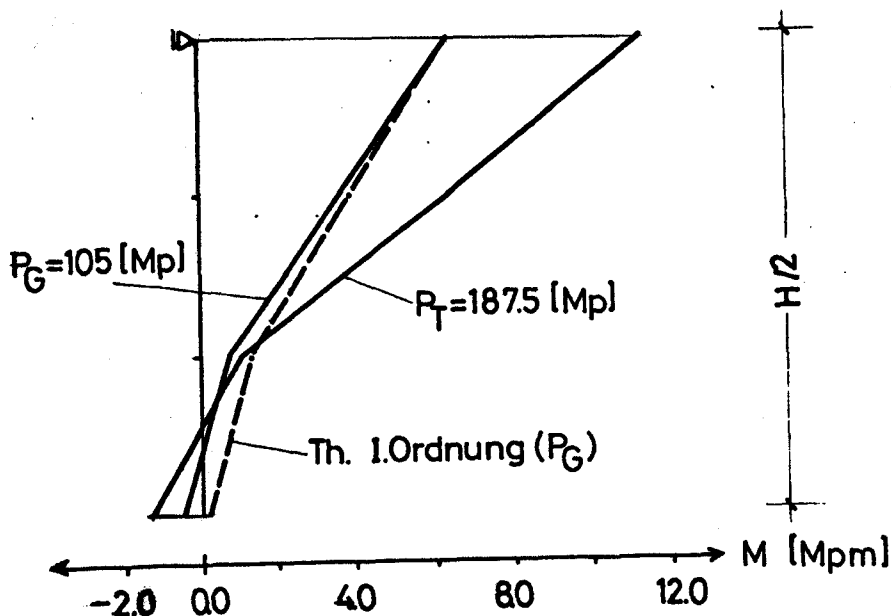
# Verformungen von ausmittig belasteten Stahlbetonwänden bei veränderlichem Seitenverhältnis $\alpha=H/B$ im Traglastzustand [cm]



$B/d = \text{const.} = 15$   
 $d = \text{const.} = 20\text{cm}$

Wenn auch über eine gewisse Grenze von  $H/B$  hinaus keine Traglaststeigerung mehr möglich ist, so unterscheiden sich die Schnittgrößen und Verformungen. Für  $\alpha > 1,5$  ist der mehrwellige Verformungszustand maßgebend. In Bild 23 sind die Durchbiegungen des jeweils letzten errechneten Gleichgewichtszustandes vor der Traglast bei konstantem Verhältnis  $B/d$  für einige Seitenverhältnisse bei sonst gleichen Voraussetzungen wiedergegeben. Der Maximalwert der Durchbiegungen ist bei dem Seitenverhältnis  $\alpha = 1,5$  zu finden. Er beträgt bei kaum unterschiedlicher Traglast das 1,5-fache des Wertes bei  $\alpha = 1,0$ . Schon bei  $\alpha = 2,0$  liegt der Maximalwert der Durchbiegungen nicht mehr in Wandmitte, sondern in den Drittelpunkten. Bei steigendem Verhältnis  $\alpha$  verlagern sich die Maximalwerte der Durchbiegungen in den Bereich der Viertelpunkte. Gleichzeitig treten Durchbiegungen mit wechselndem Vorzeichen auf.

Während bei den Werten  $\alpha = 0,50$  bis  $\alpha \approx 1,0$  das Versagen zwischen Wandmitte und Viertelpunkt eintritt, ist bei größeren Verhältnissen von  $\alpha$  das Einleitungsmoment maßgebend. Infolge der geringen Verformungen tritt bei  $\alpha > 2,0$  kein Fließen in Querrichtung auf.



**Bild 24:** Längsmomentenverlauf in Wandmitte für  $\alpha = 2,0$

Bild 24 zeigt die Längsmomente in Wandmitte für ein Seitenverhältnis  $\alpha = 2,0$  im Gebrauchslast- und im Traglastzustand. In diesem Falle tritt unter Berücksichtigung der Theorie II. Ordnung und eines wirklichkeitsnahen Werkstoffverhaltens ein Umschlagen der Momente in den negativen Bereich auf.

#### 4.2.4 Einfluß der Querbewehrung auf die Traglasten

Zur Verdeutlichung werden die Traglasten von drei drillweichen Wänden mit unterschiedlichem Querbewehrungsprozentsatz bei sonst gleichen Voraussetzungen wiedergegeben:

$$\begin{aligned} \text{allgemein: } \alpha &= 1,0 \quad H/d = 15 \quad e/d = 0,3 \quad d = 0,20 \text{ [m]} \\ \beta_R &= 2125 \text{ [Mp/m}^2\text{]} \quad \beta_S = 42000 \text{ [Mp/m}^2\text{]} \\ \mu_L &= \mu_L' = 1,0 \% \end{aligned}$$

a) $\mu_a = \mu_a' = 0,2 \%$	$P_T = 783 \text{ Mp}$
b) $\mu_a = \mu_a' = 0,5 \%$	$P_T = 914 \text{ Mp}$
c) $\mu_a = \mu_a' = 1,0 \%$	$P_T = 938 \text{ Mp}$

Die Steigerung, bezogen auf den Ausgangswert, beträgt von a) nach b)  $\sim 17 \%$ , von a) nach d)  $\sim 20 \%$

Bereits hieraus ist zu erkennen, daß eine weitere Vergrößerung der Querbewehrung keine nennenswerte Laststeigerung verursacht (Bild 25).

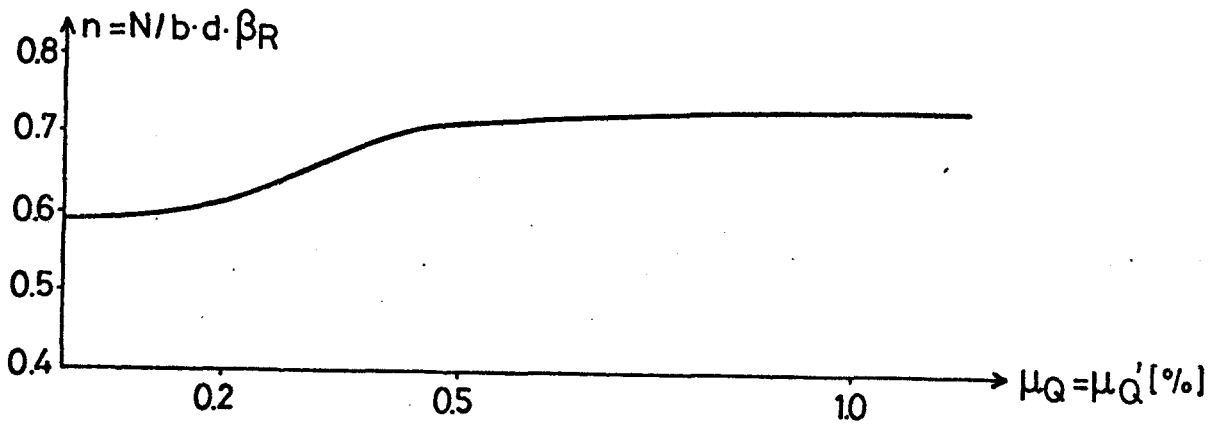


Bild 25: Bezogene Traglasten in Abhängigkeit vom Querbewehrungsprozentsatz  $\mu_Q$  ( $\mu_L = \mu_L' = 1,0 \%$ )

Der Bereich für eine wesentliche Traglaststeigerung liegt etwa zwischen  $\mu_Q = \mu_Q' = 0,2$  bis  $\mu_Q = \mu_Q' = 0,5$ . Das ist auch der Bereich, der für die Baupraxis von Interesse ist.

Als wichtigstes Ergebnis dieser Untersuchungen stellt sich heraus, daß es in manchen Fällen sinnvoll sein kann, vom üblichen Verhältnis Quer- zu Längsbewehrung ( $\mu_Q / \mu_L = 1/5$ ) abzuweichen und den Wert auf  $1/3$  oder  $1/2$  zu erhöhen.

Der relativ große Einfluß der Querbewehrung sollte auch bei Näherungsverfahren in geeigneter Form berücksichtigt werden. (s. Vorschlag des Verfassers im 5. Abschnitt)

#### 4.2.5\_Besonderer\_Vergleich\_"Ersatzstabverfahren\_-\_strenge\_Verfahren"

Die im 3. Abschnitt vorgenommene Gegenüberstellung von Wandtraglasten, die

- a) nach genauen Berechnungsverfahren
- b) nach dem Ersatzstabverfahren und
- c) im Versuch

ermittelt wurden, hat gezeigt, daß der Einfluß der vierseitigen Lagerung auf die Traglasten von Stahlbetonwänden bei weitem nicht so günstig ist, wie in [1] angenommen. Die mit den Parametern  $H/B = 1,0$  und  $\mu_L = \mu_L' = 0,8 \%$  durchgeführte Untersuchung (Bild 13) macht deutlich, daß man bei Anwendung des Näherungsverfahrens nach DIN 1045 nur im Bereich kleiner Schlankheiten, d.h.  $H/d < 20$  bei kleinen Ausmitten und  $H/d < 30$  bei großen Ausmitten, auf der sicheren Seite liegt. Demgegenüber liegt man bei den großen Schlankheiten - und das trifft insbesondere den Bereich der häufig vorkommenden kleinen Ausmitten - weit auf der unsicheren Seite.

Der Verfasser hat aus diesem Grund besondere Untersuchungen mit weiteren wichtigen Parametern - wie z.B. Seitenverhältnis und Bewehrungsgrad - durchgeführt, die einen umfassenden Vergleich "Näherungsverfahren - strenges Verfahren" ermöglichen:



Gewählte Parameter:

H/B:	1,0	0,75	0,5
e/d:	0,1	0,5	
H/d:	20	40	60
$\mu_L = \mu'_L$ :	0,2 %	0,8 %	3,0 %
$\mu_a = \mu'_a = 0,2 \cdot \mu_L$			

Als wichtigstes Ergebnis kann festgestellt werden, daß mit kleiner werdendem Seitenverhältnis die Abweichungen zur unsicheren Seite noch größer werden. Die oben angegebenen Grenzen für die Schlankheit verschieben sich auf die Werte  $H/d = 10$  bzw.  $H/d = 20$ . Der Einfluß des Bewehrungsgrades auf die Größenordnung der Abweichungen in den Traglasten ist von untergeordneter Bedeutung.

##### 5. Schlußfolgerungen mit Vorschlägen für eine Verbesserung des jetzigen Bemessungsweges für vierseitig gehaltene Stahlbetonwände in DIN 1045

Auf Grund der hier durchgeführten Untersuchungen wird es für erforderlich gehalten, die in [1] angegebenen Formeln zur Ermittlung der Knicklängenbeiwerte  $\beta$  für vierseitig gehaltene Wände zu modifizieren. Neben dem Seitenverhältnis  $H/B$  sollten auch Schlankheit und Ausmitte berücksichtigt werden.

Es werden folgende Formeln für die Ermittlung des Knicklängenbeiwertes bei vierseitig gelagerten Wänden vorgeschlagen:

$H \leq B$  :

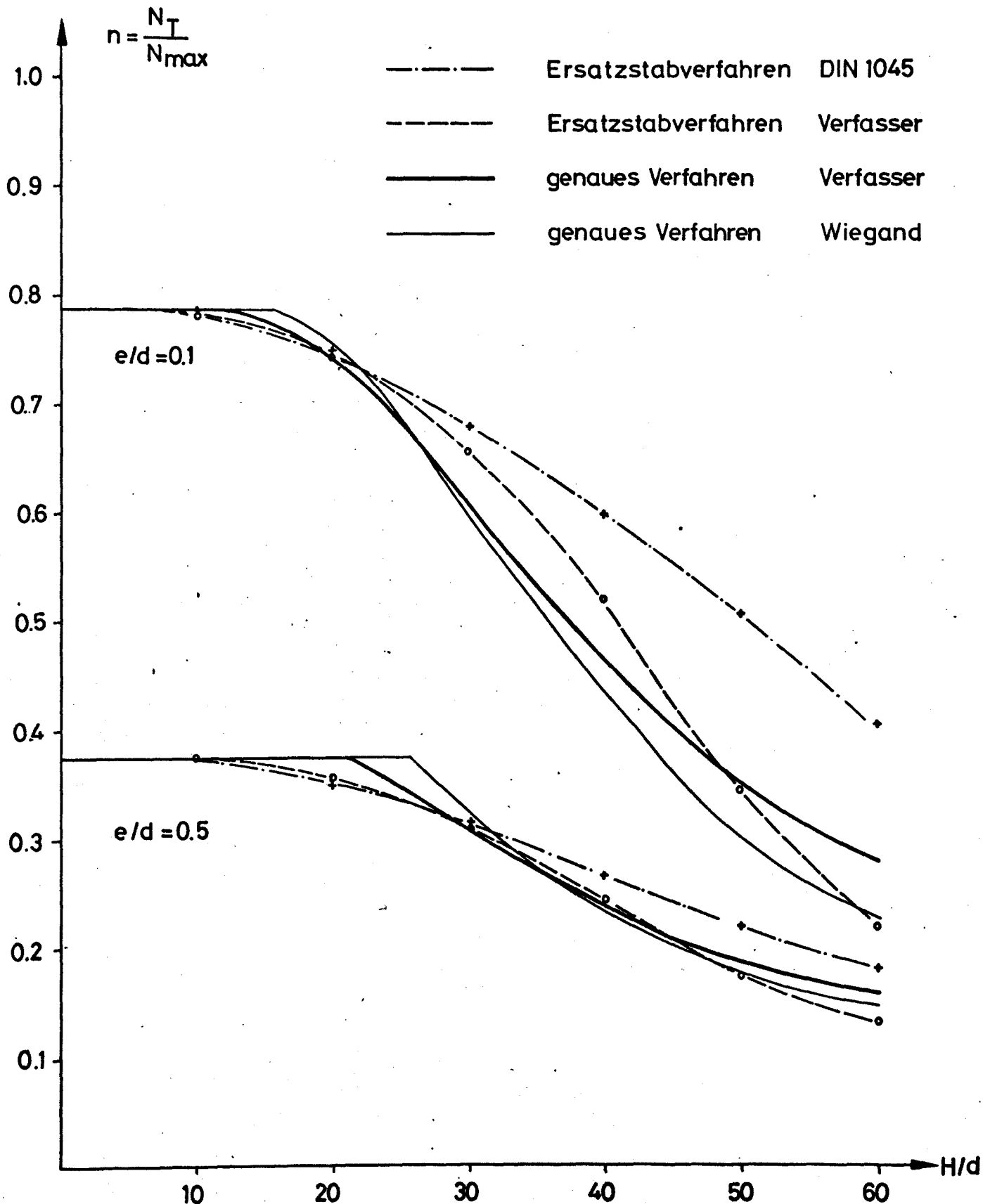
$$\beta = \frac{1}{1 + \left(\frac{H}{B}\right)^3} \left( \frac{H/d + 60}{80} \right) (1 - 0,2 \cdot e/d)$$

$H > B$  :

$$\beta = \frac{B}{2H} \left( \frac{H/d + 60}{80} \right) (1 - 0,2 \cdot e/d)$$

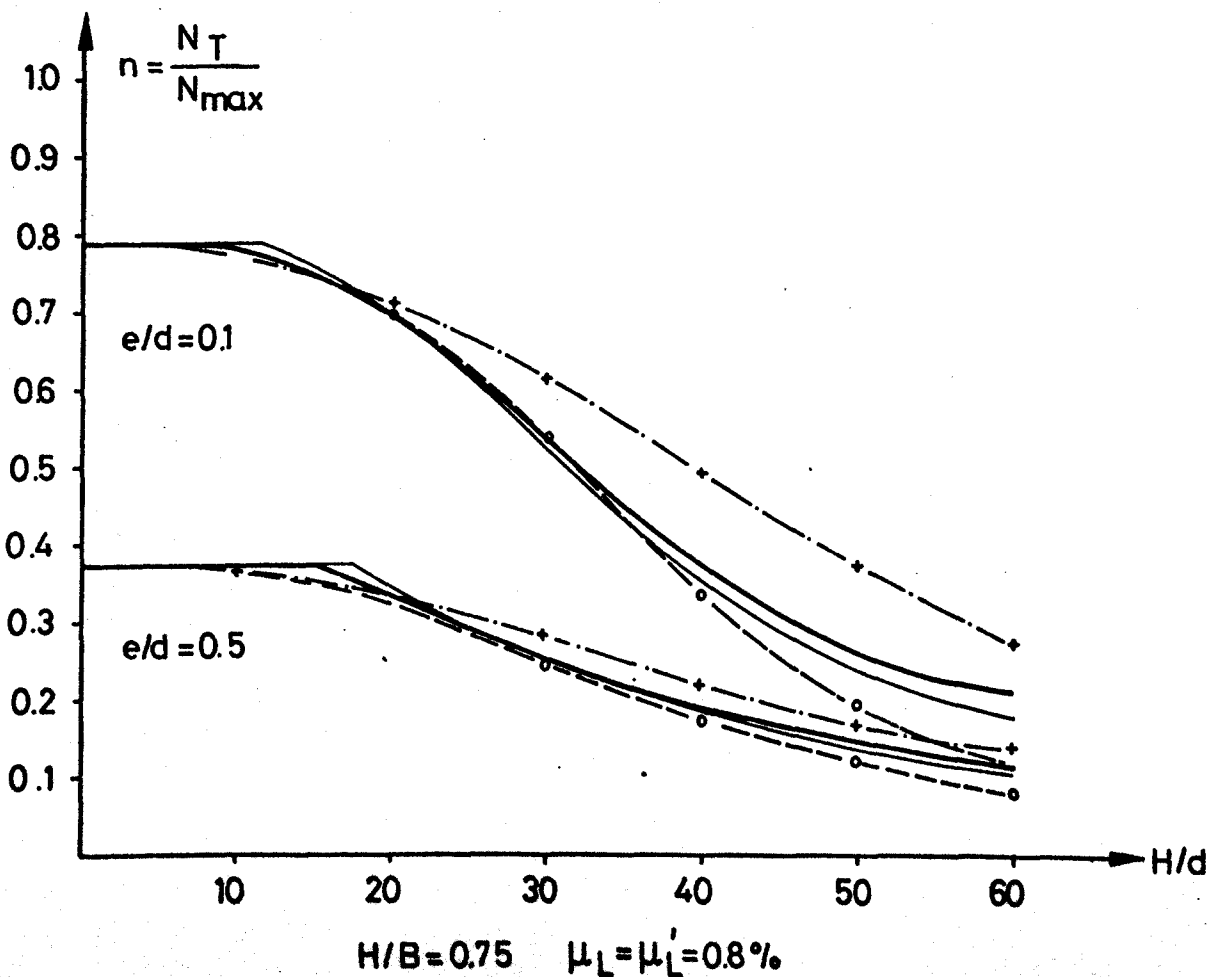
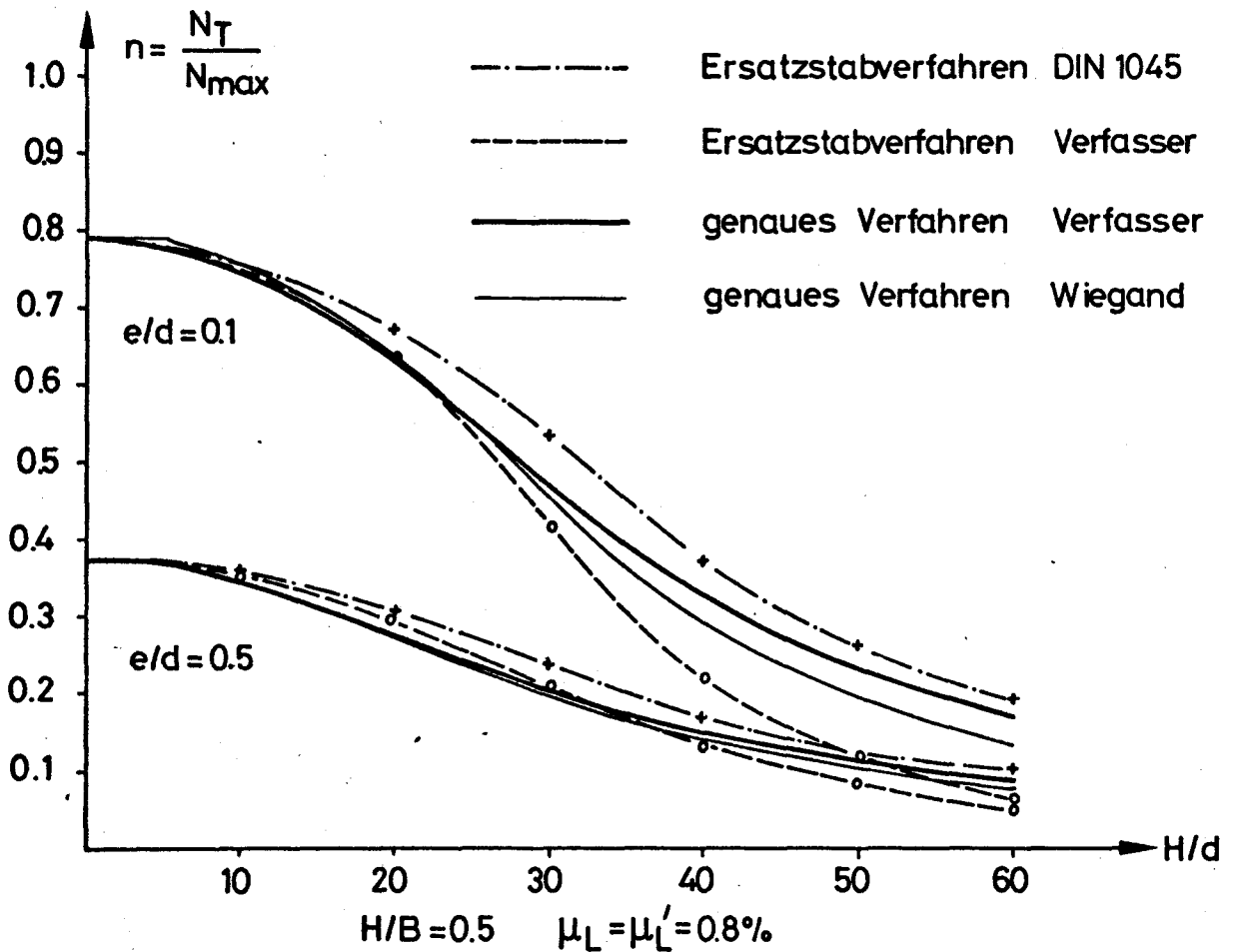
# Wandtraglasten

Vergleich: Näherungsverfahren - strenge Lösungen



$H/B = 1.0 \quad \mu'_L = \mu'_L = 0.8\%$

Vergleich : Näherungsverfahren - strenge Lösungen



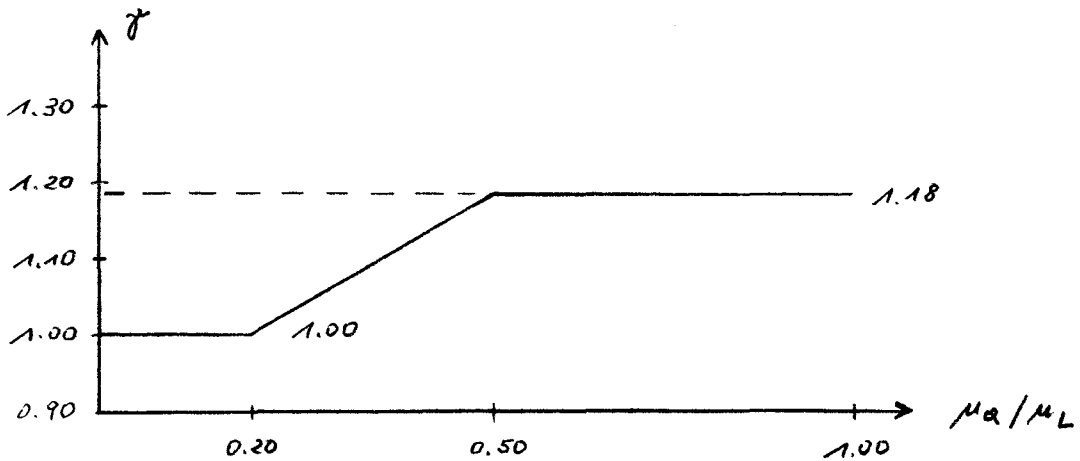
Die Anwendung wird begrenzt auf den Bereich  $H/d < 60$  und  $e/d < 0,5$ . Für Schlankheitswerte  $H/d < 20$  gilt ein Rechenwert von  $H/d = 20$  in die Formel eingesetzt.

Die Bilder 26 und 27 zeigen die mit den oben angegebenen Formeln ermittelten Traglasten im Vergleich zu den genaueren Rechnungen und den bisher nach DIN 1045 ermittelten Werten  $f$  für drei Seitenverhältnisse  $H/B$  mit dem mittleren Bewehrungsprozentsatz  $\mu_L = \mu_L' = 0,8\%$  ( $\mu_a = 0,2\%$ ,  $\mu_L$ ). Bei Schlankheiten  $H/d > 60$  und Ausmitten  $e/d > 0,5$  sowie für genauere Nachweise - z.B. für andere Querbewehrungsverhältnisse - im gesamten Schlankheits- und Ausmittenbereich sollte eine strenge Rechnung durchgeführt bzw. auf schon vorhandene Traglastdiagramme [5] zurückgegriffen werden. Ungewollte Ausmitte und Kriechen sollten entsprechend den Annahmen bei den Stützen berücksichtigt werden.

Die Parameterstudien mit Variation des Seitenverhältnisses  $H/B$  haben gezeigt, daß eine Traglaständerung infolge der Seitenverhältnisse nur in einem Bereich zwischen  $H/B \approx 0,5$  und  $H/B \approx 1,1$  zu erwarten ist. Wände mit einem Seitenverhältnis  $H/B > 1,0$  können daher näherungsweise mit  $H/B = 1,0$  behandelt werden. Ist das Verhältnis  $H/B < 0,5$ , so kann man die mehrseitige Lagerung vernachlässigen und die Wand wie eine Stütze mit der Knicklänge  $h_K = H$  behandeln.

Die Variation des Verhältnisses von Längs- und Querbewehrung zeigt, daß es auch hier einen Bereich - er liegt zwischen  $\mu_a = \mu_a' = 0,2\%$  und  $\mu_a = \mu_a' = 0,5\%$  - gibt, in dem eine Erhöhung der Querbewehrung eine wesentliche Traglaststeigerung mit sich bringt. Bei vierseitig gehaltenen Wänden sollte daher die Querbewehrung nicht zu schwach gewählt werden. Zur Erhöhung der Tragfähigkeit ist es angebracht, vom üblichen Verhältnis Quer- zu Längsbewehrung  $\mu_a / \mu_L = 1/5$  abzuweichen und den Wert auf  $\mu_a / \mu_L = 1/3$  bzw.  $1/2$  zu erhöhen. Die in

Bild 28 angegebene Beziehung ermöglicht bei Anwendung des Ersatzstabverfahrens die Ermittlung eines Erhöhungsfaktors, mit dem die am Ersatzstab ermittelten Traglasten beim Abweichen vom üblichen Verhältnis  $\mu_R/\mu_L = 0,2$  korrigiert werden können.



**Bild 28:** Erhöhungsfaktor für verschiedene Verhältnisse  $\mu_R/\mu_L$

## 6. Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit wird von Untersuchungen über das Trag- und Verformungsverhalten vierseitig gehaltener schlanker Stahlbetonwände unter einachsiger ausmittiger Belastung berichtet. Nach einer Literaturübersicht und Erläuterung der wichtigsten Berechnungen wird der hier gewählte Lösungsweg beschrieben. Dabei wird insbesondere auf die Entwicklung wirklichkeitsnaher Versagenskriterien und auf das Einbeziehen der Torsionssteifigkeit in die theoretischen Ansätze eingegangen. An Hand einer Gegenüberstellung an drillweichen und drillsteifen Ersatzsystemen ermittelter Traglasten wird gezeigt, welche Rolle der Torsionssteifigkeit zukommt.

Mit der nunmehr verbesserten Rechenmethode werden u.a. die im Versuch geprüften Stahlbetonwände berechnet und den experimentellen sowie nach verschiedenen anderen Methoden ermittelten Ergebnissen gegenübergestellt. Die nach einem bisher bekannten Näherungsverfahren von Wiegand/Uhlisch errechneten Traglasten konnten im wesentlichen sowohl rechnerisch als auch versuchsmäßig bestätigt werden.

Nach einer Erläuterung des Trag- und Verformungsverhaltens vierseitig gelagerter Stahlbetonwände und Erläuterung der im Verlaufe der Laststeigerung eintretenden Momenten- und Steifigkeitsumlagerungen sowie Verformungen, werden die Ergebnisse umfangreicher Traglastuntersuchungen dargestellt. Als Parameter werden Schlankheit, Ausmitte, Verhältnis Quer- zu Längsbewehrung sowie das Verhältnis Höhe zu Breite variiert. Es wird angegeben, welche Parameterbereiche für eine spürbare Traglaststeigerung in Frage kommen.

Die festgestellten Abweichungen zur unsicheren Seite bei der Näherungslösung nach dem Ersatzstabverfahren im Vergleich

zu den genaueren Ergebnissen und die Auswertung der umfangreichen Traglastuntersuchungen veranlaßten zu Vorschlägen für eine Verbesserung des derzeitigen Bemessungsweges nach DIN 1045 sowie für die konstruktive Durchbildung von vierseitig gelagerten Stahlbetonwänden.